

**DETERMINACIÓN DE PARAMETROS FISICO-MECANICOS Y DE DURABILIDAD
EN CONCRETO RECICLADO CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y
DEMOLICIÓN (RCD).**



JESÚS GUILLERMO REMOLINA DURÁN

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
BARRANQUILLA – ATLÁNTICO
ENERO, 2018**

TÍTULO DE INVESTIGACIÓN: DETERMINACIÓN DE PARAMETROS FISICO-MECANICOS Y DE DURABILIDAD EN CONCRETO RECICLADO CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD).

JESÚS GUILLERMO REMOLINA DURÁN

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO DE GRADO PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

Director

DR. ING. MARIAN SABAU

Codirector

ING. IVÁN SERRANO

UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BARRANQUILLA – ATLÁNTICO

ENERO, 2018

Nota de aceptación

Presidente de Jurado

Jurado

Jurado

Dedicatoria

¡Para ti Dios!

Este proyecto de grado está dedicado a Dios, porque no hay motivación más grande y perfecta que la certeza de que hacer lo que te gusta por y para El.

Para mis Padres, que con Amor y alegría me han hecho sentir cada vez más cerca de cada meta alcanzada y por alcanzar.

Agradecimientos

¡Gracias Dios!

Porque gracias a Él obtenemos esa guía en la vida y las fuerzas para permanecer en el camino.

A mi familia, papás y hermanos por su apoyo directo e indirecto en esta gran meta.

A mi tutor Ing. Marian Sabau, por la guía por compartirme su conocimiento, y guiarme en todo este importante proceso investigativo, personal y profesional.

A ANEICUC porque gracias a este grupo debo parte de lo que soy como persona y como profesional.

A la empresa MATCH OVERSEAS S.A.S por su patrocinio, el cual hizo posible este proyecto.

A mis antiguos jefes en la empresa MATCH OVERSEAS S.A.S. Carlos Gutiérrez, y María F. Vargas por sus importantes consejos.

A mis amigos por su apoyo y buenos consejos brindados en todo este tiempo.

Contenido

Glosario de símbolos y términos.....	15
Resumen.....	1
1. Introducción	5
2. Planteamiento del problema.....	7
3. Justificación	8
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos.....	9
5. Marco referencial	10
5.1. Marco teórico	10
5.2. Estado del arte	39
5.3. Marco legal.....	55
6. Diseño metodológico	62
7. Programa experimental	67
7.1. Selección de materiales	67
7.2. Procesamiento del agregado reciclado.	68
7.2.1. Recolección y transporte de los residuos de demolición.	69
7.2.2. Clasificación inicial	70
7.2.3. Trituración inicial.....	70
7.2.4. Tamizado principal	70
7.2.5. Trituración secundaria	72
7.3. Caracterización de materiales.....	72
7.3.1. Descripción general.	72
7.3.2. Granulometría	78
7.3.3. Masa Unitaria.....	85
7.3.4. Densidad relativa y absorción	86
7.4. Diseño de mezcla método A.C.I Del comité 211.1	91
7.5. Elaboración de mezclas y preparación de especímenes de concreto	105
7.6. Análisis de resultados	108

8. Conclusiones	136
Bibliografía	138
Anexos	155

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de los áridos reciclados propuesta por el Ministerio de la Construcción (Susunaga Monroy, 2013).....	17
Tabla 2. Clasificación de los RCD según RILEM («Specifications for concrete with recycled aggregates», 1994).	17
Tabla 3. Categorías según los constituyentes del agregado reciclado. Fuente: (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009).....	18
Tabla 4. Constituyentes del agregado grueso reciclado. Fuente: (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009)	18
Tabla 5. Criterios de calidad para los RCD en Holanda (The Netherlands Standardization Institute (NEN), 2005).	19
Tabla 6. Limitaciones para el uso del concreto reciclado en la normativa francesa (Association française de Normalisation, 2017).	20
Tabla 7. Clasificación de los RCD aprovechables según el plan de manejo distrital de Bogotá (Ambiente, s. f.)	21
Tabla 8. Tipos de cemento Pórtland. Fuente: (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, 2014).	32
Tabla 9. Volumen de RCD tratado por los principales países de la UE en 1999. Fuente:(European Commission Environment, 2011). -.....	46
Tabla 10. Volumen de RCD generado y tratado en principales países de Europa (Eurostat (2011), 2011).	47
Tabla 11. Composición de los RCD según algunos autores (de Brito & Saikia, 2013).	48

Tabla 12. Sistemas regulatorios destacados para la gestión de los RCD (Youcai & Sheng, 2017).	
.....	51
Tabla 13. Características generales del agregado grueso natural.	72
Tabla 14. Características generales del agregado grueso reciclado.	74
Tabla 15. Características generales del agregado fino natural.	75
Tabla 16. Características generales del cemento de uso estructural.	76
Tabla 17. Especificaciones técnicas del cemento de uso estructural Argos. Fuente: (Argos, 2017)	
.....	77
Tabla 18. Resultados obtenidos en el ensayo granulométrico a la gravilla.	79
Tabla 19. TM Y TMN obtenidos en el ensayo granulométrico a la gravilla.	80
Tabla 20. Resultados obtenidos en el ensayo granulométrico al agregado fino (Arena).	81
Tabla 21. Resultados obtenidos en el ensayo granulométrico al agregado grueso reciclado.	83
Tabla 22. Dimensiones del recipiente para ensayo de masa unitaria.	84
Tabla 23. Datos y resultados del ensayo de masa unitaria en agregados gruesos.	85
Tabla 24. Datos para el ensayo de densidad y absorción en agregado grueso natural.	87
Tabla 25. Resultados de ensayo de densidad y absorción en agregado grueso natural.	87
Tabla 26. Datos para el ensayo de densidad y absorción en agregado grueso reciclado.	88
Tabla 27. Resultados de ensayo de densidad y absorción en agregado grueso reciclado.	88
Tabla 28. Datos para el ensayo de densidad y absorción en agregado fino natural.	88
Tabla 29. Resultados del ensayo de densidad y absorción de agregado fino natural.	89
Tabla 30. Resumen general de las propiedades de los agregados a utilizar en la elaboración de concretos.	89
Tabla 31. Resumen de muestras y contenidos de AR. Elaboración propia.	90

Tabla 32. Tabla 500 -6 de la norma INVIAF capítulo 5 – especificaciones de concreto hidráulico para pavimento rígido.	92
Tabla 33. Tabla c.5.2.2.2 de la NSR -10 y fórmula escogida para mayorar la resistencia a la compresión requerida por el diseño de mezcla. Fuente: (Comisión asesora permanente para el regimen de construcciones sismo resistentes, 2010).....	93
Tabla 34. Tabla para la selección del asentamiento. Fuente: (Committee ACI 211, 2002)	94
Tabla 35. Tabla para selección del tamaño máximo nominal del agregado grueso. Fuente: elaboración propia.....	94
Tabla 36. Tabla para selección de la cantidad de agua de mezclado. Fuente: (Committee ACI 211, 2002)	95
Tabla 37. Tabla para la selección de la relación agua/cemento. Fuente: (Committee ACI 211, 2002)	95
Tabla 38. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto. Fuente: (Committee ACI 211, 2002)	96
Tabla 39. Peso seco y volúmenes absolutos de material para el cálculo del peso de agregado fino.	97
Tabla 40. Tabla de pesos seco y volúmenes absolutos completa para la muestra 1.	98
Tabla 41. Resumen de diseño de mezcla de la Muestra #1 (Muestra de control, 100% de agregado grueso natural).....	99
Tabla 42. Tabla de pesos seco y volúmenes absolutos completa para la muestra 2.	100
Tabla 43. Resumen de diseño de mezcla de la Muestra #2 (50% de agregado grueso natural y 50% de agregado grueso reciclado).	101
Tabla 44. Tabla de pesos seco y volúmenes absolutos completa para la muestra 3.	101

Tabla 45. Resumen de diseño de mezcla de la Muestra #3 (100% de agregado grueso reciclado).	
.....	102
Tabla 46. Especificaciones generales de los concretos elaborados y especímenes de ensayo. ..	103
Tabla 47. Resultados totales de ensayo de resistencia a la compresión. Fuente: Elaboración propia.	107
Tabla 48. Resultado promedio del ensayo de resistencia a compresión. Fuente: Elaboración propia.	108
Tabla 49. Propiedades de Densidad y Asentamiento del concreto. Fuente: Elaboración propia.	109
Tabla 50. Resumen de datos para la regresión lineal múltiple.	116
Tabla 51. Tabla resumen de la regresión lineal múltiple ejecutada con Excel.	117
Tabla 52. Coeficientes obtenidos en la regresión lineal múltiple.	118
Tabla 53. Tabla de f'_c experimental y f'_c calculado por regresión lineal múltiple.	118
Tabla 54. Gráfica de dispersión para f'_c experimental Vs f'_c calculado.	119
Tabla 55. Resultados de ensayo a flexión. Fuente: Elaboración propia.	121
Tabla 56. Resultado promedio de ensayo a flexión. Fuente: Elaboración propia.	122
Tabla 57. Recopilación de información de diversos autores. Fuente: (de Brito & Saikia, 2013).	129

Lista de figuras

Figura 1. Generación total de residuos en Europa según su categoría. Fuente: (de Brito & Saikia, 2013)	16
Figura 2. Composición de los RCD en la ciudad de Bogotá. Fuente: (Escombros et al., 2013) ..	23
Figura 3. Tipos de RCD generados en Barranquilla. Fuente: (Pacheco Bustos, Fuentes Pumarejo, Sánchez Cotte, & Rondón Quintana, 2017).....	24
Figura 4. Composición típica de los RCD en Bogotá. Fuente: (Escombros et al., 2013).....	25
Figura 5. Proceso general de fabricación del cemento. Fuente: Elaboración propia.....	31
Figura 6. Grafica de comparación de la producción de cemento a nivel mundial. (Cembureau, 2012, 2013, 2014, 2016). *No incluye los países de su continente que se encuentren en la gráfica.	42
Figura 7. Estimado anual de generación de residuos C&D en Europa en 2006.	46
Figura 8. Composición de los RCD. Fuente: (Fischer, C., Werge, 2009)	49
Figura 9. Composición típica de los RCD. Elaboración propia.....	50
Figura 10. Recolección y selección de agregado reciclado.	68
Figura 11. Residuos de demolición de pavimento recolectados y obtención de agregado grueso reciclado. Elaboración propia.	69
Figura 12. Máquina de tamizado diseñada por Carlos Gutiérrez y construida en la empresa MATCH OVERSEAS S.A.S. (Dueña de la marca IgNEO). Fuente: Propia.....	71
Figura 13. Muestra de agregado grueso natural. Fuente: propia.....	73
Figura 14. Bloques de agregado grueso reciclado. Fuente: propia.	74
Figura 15. Ubicación del sitio de recolección del residuo de demolición de pavimento rígido. Fuente: Google maps.	75

Figura 16. Arena de Santo Tomas. Fuente: Google.....	76
Figura 17. Bolsa de cemento de uso estructural Argos. Fuente: (Argos, 2017)	78
Figura 18. Curva granulométrica del agregado grueso natural (Gravilla).	80
Figura 19. Curva granulométrica agregado fino natural – Arena de Santo Tomas.	82
Figura 20. Curva granulométrica del agregado grueso reciclado.	83
Figura 21. Ensayo de densidad y absorción de agregados.....	86
Figura 22. Medición de datos para ensayo de densidad y absorción de agregados gruesos.....	86
Figura 25. Moldes cilíndricos para elaboración de especímenes de ensayo.....	105
Figura 26. Moldes de viguetas para especímenes de ensayo a flexión.....	105
Figura 27. $f'c$ (MPa) Vs Edad de curado (días) para un porcentaje de reemplazo de 0%.....	110
Figura 28. $f'c$ (MPa) Vs Edad de curado (días) para un porcentaje de reemplazo de 50%.....	111
Figura 29. $f'c$ (MPa) Vs Edad de curado (días) para un porcentaje de reemplazo de 100%.	111
Figura 30. $f'c$ (MPa) Vs Contenido de AR o porcentaje de reemplazo (%) a la edad de 7 días.	112
Figura 31. $f'c$ (MPa) Vs Contenido de AR o porcentaje de reemplazo (%) a la edad de 14 días.	112
Figura 32. $f'c$ (MPa) Vs Contenido de AR o porcentaje de reemplazo (%) a la edad de 28 días.	113
Figura 33. $f'c$ Vs Edad de curado para los tres tipos de concretos fabricados.	114
Figura 34. $f'c$ Vs Contenido de AR (%) para las tres edades de curado.....	115
Figura 35. MR (MPa) Vs Edad de curado (días) para un porcentaje de reemplazo de 0%	123
Figura 36. MR (MPa) Vs Edad de curado (días) para un porcentaje de reemplazo de 50%	123
Figura 37. MR (MPa) Vs Edad de curado (días) para un porcentaje de reemplazo de 100%	124
Figura 38. MR (MPa) Vs Contenido de AR (%) para una edad de curado de 7 días.	124

Figura 39. MR (MPa) Vs Contenido de AR (%) para una edad de curado de 14 días.	125
Figura 40. MR (MPa) Vs Contenido de AR (%) para una edad de curado de 28 días.	125
Figura 41. MR Vs Edad de curado para los tres tipos de concretos fabricados.....	126
Figura 42. MR Vs Contenido de AR para los tres tipos de concretos fabricados.....	127
Figura 43. Gráfica f'_c Vs MR.	128
Figura 44. Comparación con otros autores de f'_c a los 28 días.	131
Figura 45. Comparación de f'_c con autor relacionada y concreto de características similares. .	132
Figura 46. Comparación de MR con otros autores.	133

Glosario de símbolos y términos

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto.

MR: Modulo de rotura del concreto.

CC: Concreto de control (100% Agregado natural).

CAR50: Concreto con agregado reciclado en un 50%

CAR100: Concreto con agregado reciclado en un 100%

X_1 : Porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado (en %) en la Ec. (5).

X_2 : Edad de curado del concreto (en días) en la Ec. (5).

Y_A : Variable dependiente, símbolo otorgado a la resistencia del concreto en

AR: Agregado reciclado.

CAR: Concreto con Agregado Reciclado.

Resumen

El sector de la construcción a nivel mundial representa una de las principales actividades en toda sociedad y que a su vez representa en gran porcentaje la generación de toneladas y toneladas de residuos que no son tratados adecuadamente y como consecuencia generan un daño ambiental de alto impacto. La utilización de los Residuos de Construcción y Demolición como agregados para concreto contribuye una de las grandes ideas innovadoras de las últimas décadas que mitigan este daño y traen consigo un mejor desarrollo ambiental. El presente trabajo tiene por objetivo determinar y evaluar los parámetros físico-mecánicos de mezclas de concreto cuyo agregado grueso natural es reemplazado en diversos porcentajes por agregado reciclado obtenido del procesamiento de Residuos de Demolición de concreto hidráulico proveniente una vía de la ciudad de barranquilla. Se llevaron a cabo tres (3) diseños diferentes, reemplazando en un 0%, 50% y 100% del agregado natural por reciclado. Posteriormente se analizaron y evaluaron las propiedades de cada uno de los materiales para la elaboración de las mezclas tales como densidad, absorción, granulometría, humedad relativa y gravedad específica con el fin de evaluar y comparar la influencia de estos en el comportamiento de concreto en estado fresco y endurecido. De igual manera con esos materiales se elaboraron las tres mezclas de concreto con diferentes porcentajes de reemplazo con el fin de fabricar las probetas para realizar ensayos de compresión en cilindros y de flexión en tres puntos en viguetas, para ambas con días de curado de 7, 14 y 28. El análisis de resultados se llevó a cabo por medio de tablas y gráficos, sumado a diferentes métodos estadísticos y numéricos para encontrar correlaciones entre las diferentes variables analizadas y así poder llegar a una posición clara frente al objetivo del trabajo y a las investigaciones encontradas a nivel mundial. Además de determinar la posible viabilidad para la

utilización del concreto reciclado con agregados de RCD en estructuras de pavimento rígido de bajo tránsito u otras.

Palabras claves: Agregado de concreto reciclado, Residuos de Construcción y Demolición, resistencia a la compresión, módulo de rotura, aprovechamiento de residuos, propiedades físico-mecánicas, resistencia a flexión.

Abstract

The construction sector worldwide represents one of the main activities in all society and which in turn represents a sizable percentage of the generation of tons and tons of waste that are not adequately treated and therefore generate a high impact environmental damage. The use of Construction and Demolition Waste as aggregates for concrete contributes one of the great innovative ideas of recent decades that mitigate this damage and bring about better environmental development. The objective of this work is to determine and evaluate the physical-mechanical parameters of concrete mixtures whose natural coarse aggregate is replaced in different percentages by recycled aggregates obtained from the processing of hydraulic concrete demolition waste from a roadway in the city of Barranquilla. Three (3) distinctive designs were carried out, replacing 0%, 50% and 100% of the natural aggregate by recycling. Subsequently, the properties of each of the materials for the preparation of the mixtures, such as density, absorption, granulometry, relative humidity and specific gravity, were analyzed and evaluated to evaluate and compare their influence on the behavior of fresh and hardened concrete. Likewise, with these materials, the three concrete mixtures were made with different percentages of replacement to manufacture the specimens to perform compression tests in cylinders and flexure tests in three points in beams, for both with curing days of 7, 14 and 28. The analysis of results was carried out by means of tables and graphs, together with different statistical and numerical methods to find correlations between the different variables analyzed and thus be able to reach a clear position regarding the objective of the work and the researchers found worldwide. In addition to determining the feasibility of using recycled concrete with RCD aggregates in low transit or other rigid pavement structures.

Keywords: *Recycled concrete aggregate, Construction and Demolition Waste, compressive strength, modulus of rupture, waste utilization, physical-mechanical properties, flexural strength.*

1. Introducción

Un sector determinante en el desarrollo sostenible de cualquier país es el adecuado crecimiento del sector de la construcción, debido a que se encarga de la infraestructura básica y necesaria para su habitar tales como vías, puentes, edificaciones, entre otros. Ante la evidente evolución de este sector se encienden dos alarmas principales, la primera de ellas la sobre explotación de materias primas para la producción de concreto como agregados minerales por motivo de la demanda de construcción y la segunda, la alta generación de Residuos de Construcción y Demolición por razón de remodelaciones, demoliciones y reconstrucciones de infraestructuras antiguas o en desuso.

Actualmente los principales países del mundo le han puesto la lupa a esta problemática volviéndose gestores de la recolección y reutilización de los RCD, entre muchas otras políticas regulatorias y crecimiento en el campo académico de este tema; todo ello con el fin de minimizar este impacto y optimizar los recursos tan valiosos. Los pioneros en este campo son países como España, Holanda Bélgica donde ya existen normas de reutilización y que además exigen cierto porcentaje de recuperación de materiales ya sea en su reciclaje o en su adecuado vertimiento.

El repertorio de posibilidades de reutilización y recuperación de estos residuos es amplio, y apenas ahora en pleno siglo XXI cuando las empresas, las industrias y el sector académico ponen manos a la obra al respecto.

En Colombia actualmente el desarrollo en cuanto a políticas, normas, y desarrollo científico para poder afrontar esta problemática, es muy pobre, por lo que en la mayoría de los casos se ha optado por tomar normativas o proyectos internacionales a intentar implementarlos a nivel nacional, lo más destacado al respecto han sido los planes de gestión de residuos desarrollados por las principales ciudades, por supuesto entre esas la Ciudad de Barranquilla que sin duda

alguna en pleno auge y crecimiento en cuanto a obras de infraestructura se refiere, debe tomarse cartas en el asunto.

En el presente trabajo, trayendo una investigación de este tipo, que hoy en día son numerosas, a la ciudad de Barranquilla, se recolecta una cantidad determinada de Residuos de demolición de pavimento en la ciudad y se procesa para utilizarlo como reemplazo del agregado grueso natural en mezclas de concreto (en porcentajes de 0%, 50%, y 100%) para posteriormente someter dicho concreto a pruebas mecánicas de compresión y flexión, lo que permitirá crear una hipótesis de la viabilidad o no viabilidad de este tipo de materiales verdes para la construcción a nivel local y nacional.

2. Planteamiento del problema

Barranquilla sigue siendo considerada la principal y más importante ciudad del caribe colombiano, este título le es otorgado gracias a su nivel de desarrollo en infraestructura, aporte cultural y por supuesto la influencia económica y comercial de sus puertos. Actualmente en la ciudad se están desarrollando todo tipo de proyectos de infraestructura de alto impacto para el país como puentes, escenarios deportivos y nuevas y modernas edificaciones. Proyectos de este tipo que implican de forma directa dentro de sus procesos, actividades de construcción y/o demolición que a su vez traen como consecuencia la generación desmedida de aquellos residuos conocidos como Residuos de Construcción y Demolición.

Sin embargo, debido al constante crecimiento de obras de infraestructura sin planificación y control de desechos producidos por dichas obras han aumentado de forma proporcional a la construcción en la ciudad, Barranquilla se ha visto afectada por la cantidad de escombros en sus calles.

La consecuencia más notoria ha sido los lotes de la ciudad que se han convertido en basureros clandestinos, estos manejan alta cantidad de desechos de las construcciones cuando ocurre un evento de precipitación estos desechos como lo son concreto triturado, ladrillos, entre otros se esparcen por distintos barrios de la ciudad.

Por esta razón los desechos de la ciudad deben tener una utilidad en la construcción de pavimentos con un nivel de tránsito bajo para lograr acabar con la problemática de residuos y garantizar el buen manejo y control de los materiales sobrantes en las estructuras construidas.

¿Es viable desde el punto de vista estructural la utilización de concreto reciclado para la construcción de pavimento rígido de bajo tránsito?

3. Justificación

Barranquilla surge como una ciudad con carencia de planificación, con falta de control de residuos de construcción; y además de adoptar genéricamente costumbres populares y falta de cultura ciudadana.

En medio de esta problemática, después no tener estudios los cuales hablen acerca de cómo mitigar estos residuos y mucho menos de cómo utilizarlos para construcción en obras viales, surge esta idea de utilizar los residuos de las construcciones en la ciudad de barranquilla y evitar la propagación de estos en la ciudad. La ingeniería civil nos brinda la solución al problema mediante la construcción de proyectos de comunicación terrestre.

De ahí, parte la visualización y proyección de una nueva ciudad sin escombros en sus calles y sin el impacto ambiental tan alto que generan, por el contrario que estos escombros sean los nuevos agregados finos y gruesos para el diseño de mezcla de un pavimento rígido en distintos sectores de barranquilla donde el tránsito vehicular sea liviano.

4. Objetivos

4.1.Objetivo general

Determinar aspectos de comportamiento físico-mecánico y de durabilidad en mezclas de concreto con diferentes porcentajes RCD como reemplazo de agregado grueso que permitan establecer la viabilidad para uso en vías de pavimento rígido de bajo tránsito u otras aplicaciones.

4.2.Objetivos específicos

- Caracterizar el RCD de concreto obtenido en la ciudad de Barranquilla según técnicas estandarizadas para tal fin.
- Procesar el RCD obtenido para que cumpla con los parámetros básicos de granulometría del agregado grueso para mezclas de concreto.
- Evaluar la calidad de los materiales a utilizar en las mezclas de concreto con diferentes porcentajes de reemplazo de RCD a realizar.
- Realizar diseños de mezclas de concreto con diferentes porcentajes de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado (RCD).
- Comparar las propiedades físico-mecánicas de las mezclas de concreto de agregado reciclado con las de una mezcla con 100% de agregado natural.
- Evaluar la durabilidad de las mezclas de concreto reciclado obtenidas respecto a una de concreto con agregado natural.
- Determinar según los estudios realizados la viabilidad del uso de concreto reciclado con diferentes porcentajes de reemplazo de RCD para la construcción de pavimento rígido de bajo tránsito.

5. Marco referencial

5.1.Marco teórico

5.1.1. Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

5.1.1.1. Definición de los RCD

Los Residuos de Construcción y Demolición, comúnmente conocidos bajo las siglas RCD (CDW en inglés) son todos aquellos desechos generados en actividades de cualquier etapa de un proceso constructivo de todo tipo de obras civiles o en su defecto obras de remodelación y/o demolición de estas. Algunas definiciones generadas a partir de este término son:

Se consideran residuos de construcción y demolición (en adelante RCD) aquellos que se generan en el entorno urbano y no se encuentran dentro de los comúnmente conocidos como Residuos Sólidos Urbanos (residuos domiciliarios y comerciales, fundamentalmente), ya que su composición es cuantitativa y cualitativamente distinta. Se trata de residuos, básicamente inertes, constituidos por: tierras y áridos mezclados, piedras, restos de hormigón, restos de pavimentos asfálticos, materiales refractarios, ladrillos, cristal, plásticos, yesos, ferrallas, maderas y, en general, todos los desechos que se producen por el movimiento de tierras y construcción de edificaciones nuevas y obras de infraestructura, así como los generados por la demolición o reparación de edificaciones antiguas. (Romero, 2006)

Los residuos de construcción y demolición – RCD (anteriormente conocidos como escombros) son aquellos residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición y reparaciones o mejoras locativas de obras civiles o de otras actividades conexas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

El término "residuos C&D" se utiliza generalmente para referirse a los residuos sólidos generados en el sector de la construcción. Más específicamente, el término se define como los residuos que surgen de las actividades de construcción, renovación y demolición incluyendo la excavación o formación de terrenos, construcción civil y de edificios, remoción de sitios, actividades de demolición, obras viales y renovación de edificios (Shen, Tam, Tam, & Drew, 2004).

El termino RCD o CDW ha tomado gran importancia en la última década debido a la importancia que este tiene tanto como problemática por su producción como por la gran fuente de material reciclable que representa. Antes de abordar este tema de manera puntual, se expondrá los principales antecedentes y datos para tener en cuenta al respecto.

5.1.1.2. Antecedentes de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

Los residuos de construcción y demolición existen desde la aparición de las antiguas civilizaciones en todo el mundo las cuales desarrollaban diversos tipos de construcciones alusivas a su cultura y que por motivo de la construcción de los mismos y posteriormente su desaparición o demolición por efectos de sucesos históricos como guerras, invasiones, cambios de mandatos, etc.; generaban lo que hoy llamamos RCD; por supuesto en ese entonces constituidos por tipos de materiales diferentes a los de la actualidad. A pesar de que dichos residuos ya existían en aquellos tiempos, la concepción de estos como problemática era nula, así como las intenciones de reutilizar dichos materiales y/o darles una adecuada disposición. No obstante, algunas investigaciones sustentan muestras indirectas de aprovechamiento de los RCD (la mayoría bloques de piedra) por medio de hechos como la construcción de imperios romanos sobre las ruinas de culturas anteriores derrotadas o algunas construcciones actuales como el vaticano del cual se dice que la mayoría de las piedras usadas para su construcción salió de las

construcciones romanas que existían en el momento (Bobadilla, 2012), incluso se dice que algunas pirámides de la civilización Egipcia sirvieron de cantera para construir edificios cercanos, así como también algunos templos caucásicos y murallas fueron despiezadas para construir edificaciones medievales en toda Europa (de Santos, Monercillo, & García, 2011).

La idea directa más clara (que puede ser concebida como necesidad) de reutilizar los RCD en lugar de disponer de ellos en vertederos o lugares de relleno, se remonta a finales de la Segunda Guerra Mundial (Mena & Valdés, 2014) (a partir del año 1945) debido a la destrucción producida por los bombardeos los cuales habían creado montañas de escombros en los corazones de las grandes ciudades europeas (de Santos et al., 2011), a partir de allí estos residuos comenzaron a ser un problema y empezaron a ser reutilizados en la reconstrucción o reparación de las casas de aquel tiempo.

Luego del éxito de esta práctica en Europa se intentó replicar e implementar en todo el mundo, países como Estados Unidos desarrollaron proyectos de aplicación no estructural que utilizaran los RCD como sub-base y base de infraestructuras viales de aeropuertos, carreteras y puentes, un ejemplo de ellos fueron los proyectos desarrollado en: aeropuerto de Atlanta y la carretera hacia Illinois. Otros casos específicos se dieron en 1977 cuando se usó el agregado como sub-base del aeropuerto de Jacksonville, Florida y en 1980 en Ministerios de Transporte de Minnesota donde se reciclo 16 millas de concreto para el uso de infraestructuras viales. Aunque fue en Oklahoma, el primer Estado en reciclar los escombros de un proyecto (Bobadilla, 2012). No obstante, poco a poco estos proyectos fueron siendo replicados en países como Japón, China y La Unión Europea en aplicaciones similares como carreteras y vías de aeropuerto, así como en estructuras básicas.

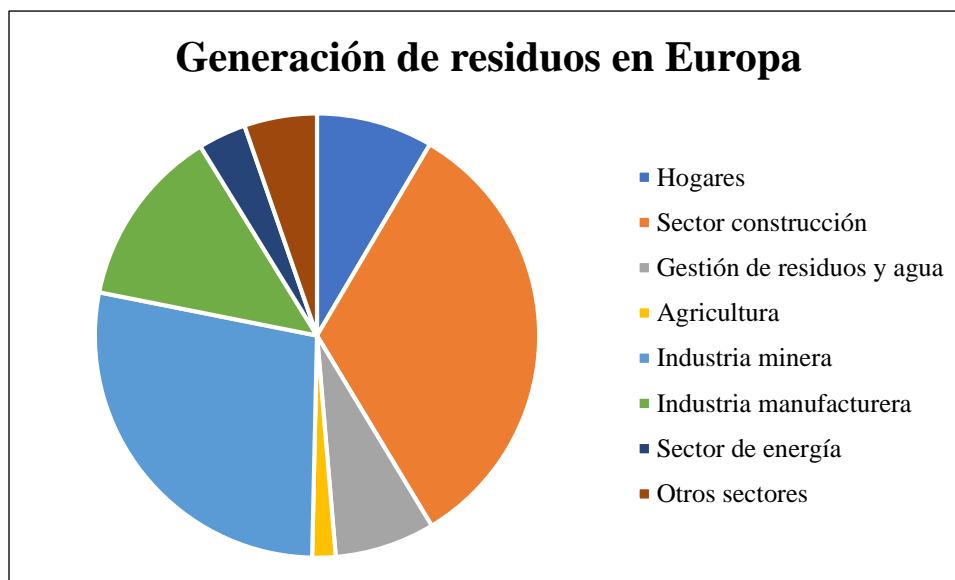
Durante las décadas siguientes la industrialización y el crecimiento del sector de la construcción, jugaron un papel importante en la percepción y comprensión del problema que acarrearían los RCD, especialmente para los países que hoy se conocen como potencias o pioneras en desarrollo. Dos factores decisivos empezarían a moldear el panorama; el primero de ellos, un crecimiento demográfico masivo en los principales países del mundo, lo que traería como consecuencia directa la alta demanda de construcción de todo tipo de infraestructuras, en especial viviendas y zonas urbanas para suplir dicho crecimiento; y el segundo factor (consecuencia del primero) una sobredemanda y peor aún sobreexplotación de recursos de todo tipo, renovables y no renovables sumado a la generación en masa de RCD's por motivo de remodelaciones, demoliciones y reconstrucción de infraestructuras antiguas o en de uso, es decir, al aumentar la necesidad de construcción aumenta de forma directa la demanda de los recursos o materiales necesarios para llevar a cabo dicha actividad, en este caso conduce a la producción elevada del cemento y a la explotación de áridos minerales para la elaboración del concreto, que como es sabido es el principal compuesto utilizado en la construcción de todo tipo de obras civiles a nivel mundial, por consecuencia las actividades constructivas y de demolición empezarían a predominar. Las combinaciones de todos estos aspectos comenzaron a generar un marcado desequilibrio ecológico y ambiental que trazaría a partir de ese momento los lineamientos de los más importantes retos para afrontar dicho desequilibrio.

Desde ese momento en que se tomó conciencia de la gran problemática a afrontar se comenzó a estudiar la generación de RCD's que a su vez genera un cuestionamiento sobre el consumo ilimitado de los recursos naturales que poseemos y nace una conciencia verde alrededor de los años 80 en los que se intenta dar respuesta a la demanda de construir cumpliendo los criterios de sustentabilidad y utilidad medioambiental. Es entonces cuando al ver el efecto que

esto estaba generando que se piensa en crear y promover normas y/o políticas que promuevan el uso y la disposición adecuada de los RCD, siendo pionero en estas políticas países como Países Bajos, Dinamarca, Rusia, Alemania entre otros. Posteriormente comienzas a surgir las primeras normas para la utilización de agregados reciclados en el concreto, en 1977 en Japón, en 1982 surge la Norma ATM C 32-82 y C 125 – 79, suiza se destaca por implementar el sistema de RC desde hace más de 4 décadas en el cual el 95% de sus construcciones provienen de material reciclado (Rosas Chaves, 2014). En países aún más industrializados como Alemania, Holanda y Dinamarca se presenta un incremento especial del tratamiento y reciclaje motivado en gran parte por la penalización legal del vertido, del mismo modo en el sector privado ha funcionado este mecanismo con el fin de economizar costos. Países como Francia y España también se han preocupado por replicar estas medidas, así como las investigaciones al respecto.

La unión europea es la comunidad de países que representa una gran parte de los RCD generados nivel mundial. En 2004, 2006 y 2008, la generación total de residuos en los 27 países de la Unión Europea ascendió a 2,68, 2,73 y 2,68 mil millones de toneladas, respectivamente, además según estas estadísticas cada ciudadano de la Unión Europea produjo una media de 5,2 toneladas de residuos en 2008, de los cuales 196 kg eran peligrosos. La construcción (859 millones de toneladas o el 32,9 % del total) y la minería (727 millones de toneladas o el 27,8 % del total) son los principales sectores económicos que generaron la mayor parte de los residuos en 2008, (Fig. 1) (de Brito & Saikia, 2013; Eurostat (2011), 2011).

Figura 1.



Nota. Generación total de residuos en Europa según su categoría. Fuente: (de Brito & Saikia, 2013)

Por otra parte en países como Estados Unidos los residuos procedentes de demolición de estructuras pasaron de ser alrededor de 123 millones de toneladas anuales en 2004 (US Department of Transportation, 2004) y 136 millones en 2006 (Sandler & Swingle, 2006) a 325 millones en el último año (Youcai & Sheng, 2017) el cual a su vez representa entre el 25 y 40% del total de residuos, entre el 20 y 30% son reciclados y gran mayoría del restante se dispone en vertederos. Debido a la alta producción de agregado natural en este país (2 billones de toneladas anuales), se busca reducir esta producción para así preservar este recurso que es tan importante en el área de la construcción.

El panorama en Colombia es algo parecido, no obstante, la política para abordar los procesos de gestión de RCD son poco desarrollados y tienden a ser copias de las normativas internacionales. Ciudades como Bogotá producen un promedio de 14'027'000 m³ de RCD al año

((UAESP), 2012), Cali a su vez genera 2480m³ de estos, y ciudades como Medellín tienen una cifra más alta que oscila entre 8000 y 8500 toneladas diarias (Bran, 2016).

5.1.1.3. Clasificación de los RCD

Con base en la definición de los RCD (numeral 5.1.1.1.) se pensaría que su clasificación es tarea sencilla, no obstante, debido a que cada país tiene políticas diferentes de gestión de residuos, unas más avanzadas a otras, sumado al hecho de que los niveles, métodos y materiales de construcción son diversos, se han creado diversas formas de clasificar este tipo de residuos tomando en cuenta parámetros diferentes.

(KAWANO, 2000) Plantea una clasificación propuesta por el ministerio de la construcción en Japón, dividiendo los agregados reciclados en clases (Figura 2).

Tabla 1.

Clasificación de los áridos reciclados propuesta por el Ministerio de la Construcción (Susunaga Monroy, 2013).

Agregado grueso			Agregado fino		
Clase	Absorción de agua	Reducción en peso	Clase	Absorción de agua	Reducción en peso
I	<3%	<12%	I	<5%	<10%
II	<3%	<40%	II	<10%	-
III	<5%	<12%			
	<7%	-			

Nota. Adaptado de (Susunaga Monroy, 2013).

A nivel latinoamericano la comunidad brasilera RILEM en el año 1994 clasifica como agregados de la siguiente forma:

Tabla 2.

Clasificación de los RCD según RILEM («Specifications for concrete with recycled aggregates», 1994).

TIPO I	Compuesto por escombros de mampostería.
TIPO II	Compuesto primariamente de escombros de concreto.
TIPO III	Mezcla de agregado reciclado con agregado natural.

Nota. Adaptado de RILEM («Specifications for concrete with recycled aggregates», 1994).

La norma noruega EN 12620 + A1 (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009) por su parte clasifica el árido grueso reciclado con mayor detalle como el contenido de cada uno de sus constituyentes como se observa en las tablas 5 y 6.

Tabla 3.

Categorías según los constituyentes del agregado reciclado. Fuente: (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009).

Componente	Content	Categoría
R_C	≥ 90	$R_C 90$
	≥ 70	$R_C 70$
	< 70	$R_C D$
	Ningún requisito	$R_C SR$
$R_C + R_U$	≥ 90	$R_{CU} 90$
	≥ 70	$R_{CU} 70$
	≥ 50	$R_{CU} 50$
	< 50	$R_{CU} D$
	Ningún requisito	$R_{CU} SR$
R_B	< 10	$R_B 10$
	< 30	$R_B 30$
	< 50	$R_B 50$
	> 50	$R_B D$
	Ningún requisito	$R_B SR$
R_A	< 1	$R_A 1 -$
	< 5	$R_A 5 -$
	< 10	$R_A 10 -$
$FL_S + FL_{NS}$	< 1	$FL_{total} 1$
	< 3	$FL_{total} 3$
FL_{NS}	< 0.01	$FL_{NS} 0.01$
	< 0.05	$FL_{NS} 0.05$

	<0.1	$FL_{NS}0.1$
$X + R_G$	<0.2	$XR_G0.2$
	<0.5	$XR_G0.5$
	<1	XR_G1

Nota. Adaptado de: (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009).

Tabla 4.

Constituyentes del agregado grueso reciclado. Fuente: (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009).

Componente	Descripción
R_C	Concreto, productos de concreto, mortero, bloques de concreto
R_U	Piedra natural, agregado reciclado limpio (sin mortero)
R_B	Bloques, tejas, unidades de mampostería, silicato de calcio, hormigón celular flotante.
R_A	Material bituminoso
R_G	Vidrio
FL_S	Material de piedra flotante (<1 mg/m ³)
FL_{NS}	Material flotante no rocoso (<1mg/m ³)
X	Otros: material cohesivo (sólidos y arcillas), metales, madera no flotante, plástico.

Nota. Adaptado de: (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2009)

Holanda es uno de los países más avanzados en el tema del aprovechamiento del concreto reciclado y la disposición de normativas que recoge la utilización de agregado reciclados. La norma NE-5905 (The Netherlands Standardization Institute (NEN), 2005) no solo recoge los criterios de calidad para los agregados gruesos reciclajes procedente del concreto, sino también las recomendaciones sectoriales sobre agregados gruesos para concreto y agregados finos para concreto de manera que lo certifique.

Tabla 5.

Criterios de calidad para los RCD en Holanda (The Netherlands Standardization Institute (NEN), 2005).

Exigencia obligatoria	Agregado reciclado procedente de concreto
Índice de lajas	<40%
Contenido de conchas	<10%
Forma	<35%
Contenido de fino <0.063	<3%
Coefficiente de los ángeles	<40%
Contenido de materia de densidad > 2100 kg/m³	>90%
Contenido de cloruros	<1% (Concreto en masa) < 0.05% (concreto armado)
Contenido de sulfatos solubles en acido	<1%
Contenido de compuestos totales de azufre	<1%
Reactividad alcali-silice	No reactivo
Materiales ligeros	<0.1%
Terrones de arcilla	<0.5%

Nota. Adaptado de: Holanda (The Netherlands Standardization Institute (NEN), 2005).

A diferencia de otros países de Europa, en Francia no hay un reglamento o norma sobre los materiales de residuos de construcción y demolición. Aunque en varios documentos se hace referencia que cualquier producto novedoso es autorizado siempre y cuando contenga un documento de idoneidad técnica, el cual establezca su oportunidad de su uso desde sus limitaciones y/o prohibiciones.

Tabla 6.

Limitaciones para el uso del concreto reciclado en la normativa francesa (Association française de Normalisation, 2017).

Elementos	Max contenido de impurezas % proporción en masa	
	RCA	RA
Contenido de finos	5	3
Contenido de sulfato soluble en acido	1	1
Material cerámico	5	100

Partículas ligeras	0.5	1
Asfalto	5	1
Otros materiales	1	1

Nota. Adaptado de: (Association française de Normalisation, 2017).

Aunque a nivel nacional no existen especificaciones técnicas sobre la clasificación de los Residuos de construcción y Demolición o en su defecto los parámetros de aceptación de estos, los entes locales departamentales han desarrollado clasificaciones más generales que permiten establecer una separación visual de los mismos a nivel industrial. Este es el caso de la guía para la gestión de Residuos de Construcción y demolición en Bogotá.

Tabla 7.

Clasificación de los RCD aprovechables según el plan de manejo distrital de Bogotá (Ambiente, s. f.).

Categoría	Grupo	Clase	Componentes
RCD Aprovechables	I. Residuos mezclados	Residuos pétreos	Concretos, cerámicos, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques o fragmentos de roca, baldosín, mortero y materiales no pasantes al tamiz # 200
	II. Residuos de material fino	Residuos finos no expansivos	Arcilla, limos y residuos inertes que sobrepasen el tamiz # 200
		Residuos finos expansivos	Arcillas y lodos inertes con gran cantidad de finos altamente plásticos y expansivos que sobrepasen el tamiz # 200
	III. Otros residuos	Residuos no pétreos	Plásticos, PVC, maderas, papel, siliconas, vidrios, cauchos
		Residuos de carácter metálico	Acero, hierro, cobre, aluminio
		Residuos orgánicos	Residuos de tierra negra
		Residuos orgánicos vegetales	Residuos vegetales y otras especies bióticas

Nota. Adaptado de: (Ambiente, s. f.).

5.1.1.4. Composición de los RCD

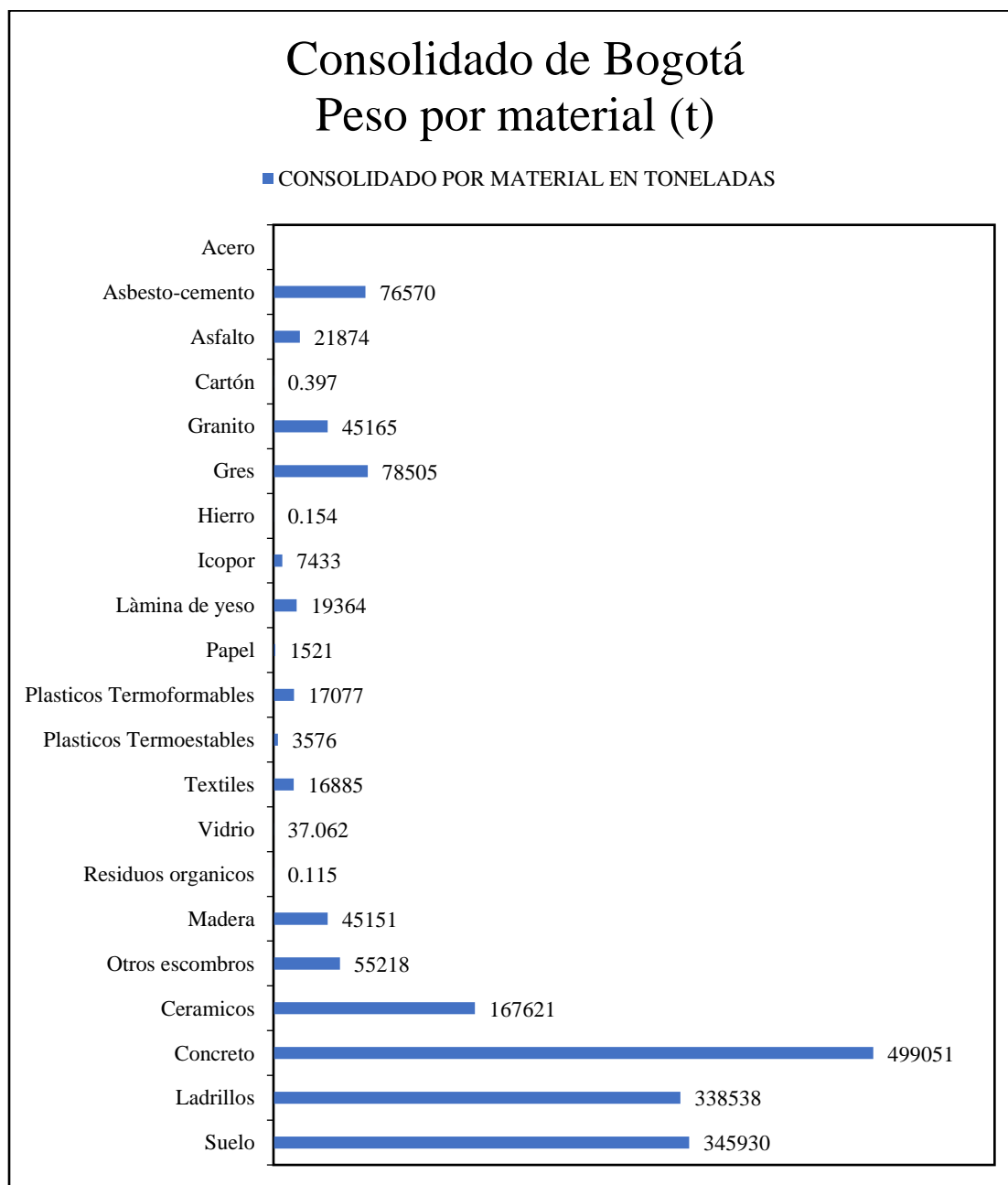
La composición de los Residuos de Construcción y Demolición, es decir los tipos de materiales que pueden encontrarse en una masa determinada de RCD, puede ser muy variable y dependen de diversos factores, entre los que más influyen se encuentran la ubicación geográfica, tipología y etapa de construcción. Muchos autores alrededor de mundo se han dedicado a realizar investigaciones de caracterización y clasificación manual y/o industrial de los RCD de las principales obras civiles y por ello los resultados son variables.

Una de las clasificaciones más comunes es la propuesta por la lista Europea de desechos (EC Commission of the European communities., 2000) en la que se contemplan una amplia gama de materiales, excluyendo los residuos peligrosos los más comunes son:

- Hormigón, ladrillos, tejas y cerámica;
- Madera, vidrio y plástico;
- Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y productos alquitranados;
- Metales;
- Suelo (incluida la tierra excavada de lugares contaminados).

En el año 2013 los autores (Escombros, La, Bogotá, La, & Bogotá, 2013) desarrollaron una importante caracterización en la ciudad de Bogotá en la cual obtienen un consolidado total de los tipos de materiales que se pueden encontrar como RCD y la cantidad de los mismos en millones de toneladas, esta información la expresaron de la siguiente manera:

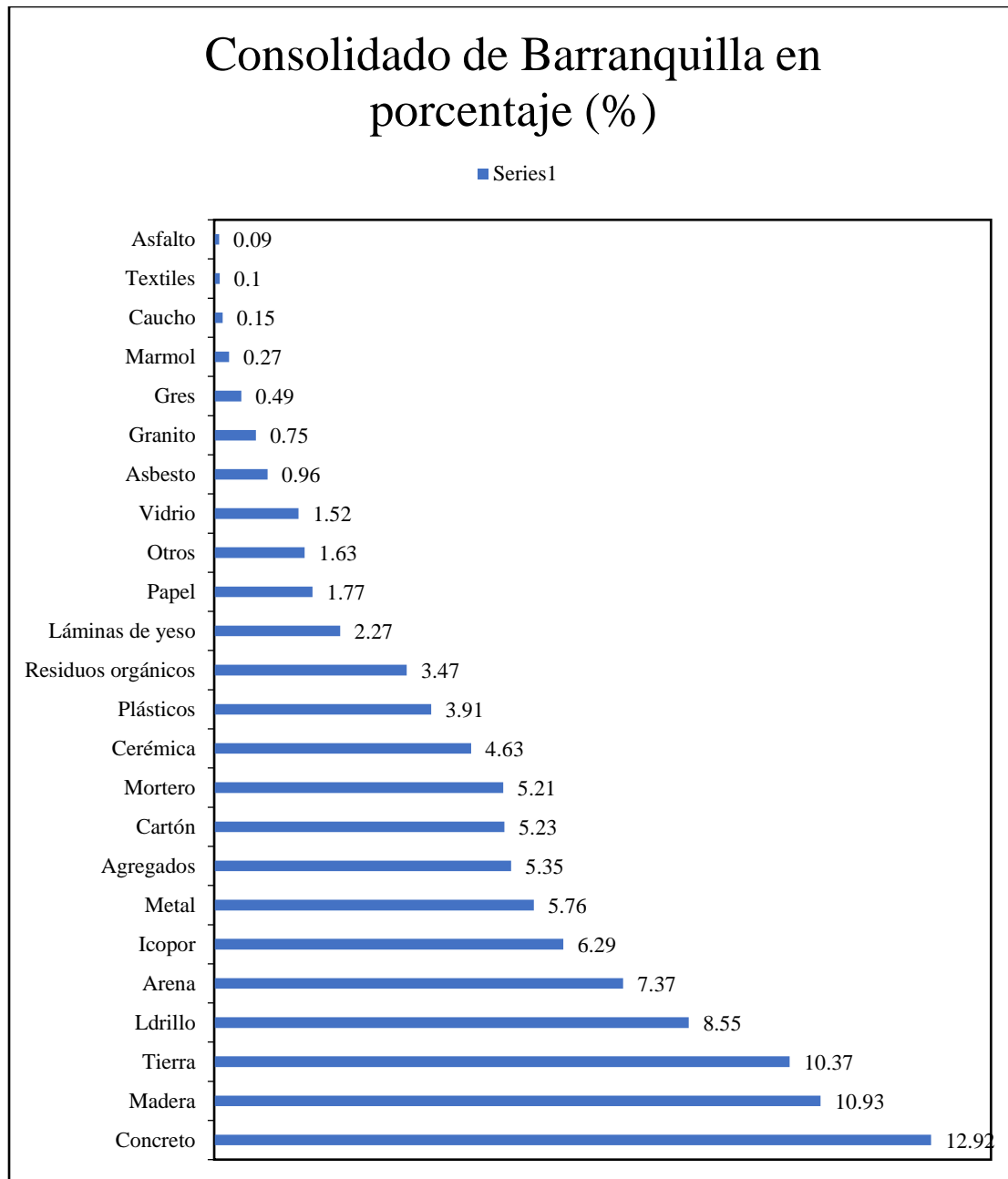
Figura 2.



Nota. Composición de los RCD en la ciudad de Bogotá. Fuente: (Escombros et al., 2013).

Este mismo tipo de estudio fue realizado en la ciudad de Barranquilla lo que nos aporta un panorama más local sobre los tipos de RCD que se generan en la ciudad.

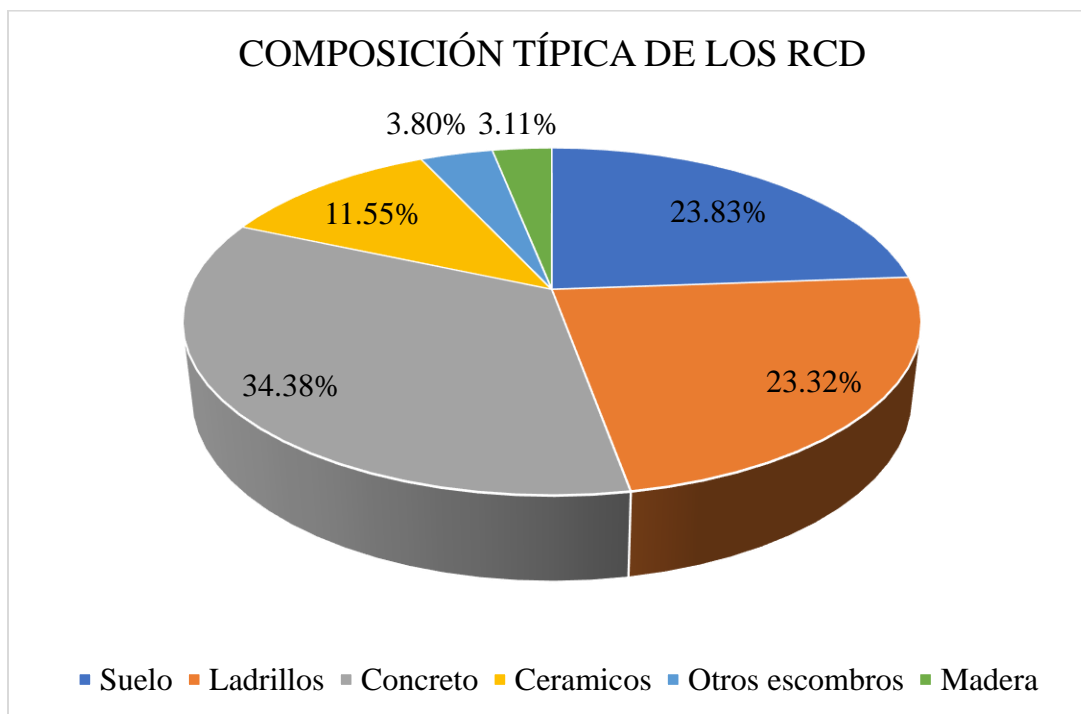
Figura 3.



Nota. Tipos de RCD generados en Barranquilla. Fuente: (Pacheco Bustos, Fuentes Pumarejo, Sánchez Cotte, & Rondón Quintana, 2017).

Tomando como referencia la anterior figura y extrayendo los tipos de materiales más comunes, de mayor interés y capacidad de reutilización es posible establecer una composición típica en porcentajes de los RCD.

Figura 4.



Nota. Composición típica de los RCD en Bogotá. Fuente: (Escombros et al., 2013).

5.1.2. Generalidades del concreto

El concreto es el principal material de construcción por excelencia a nivel mundial, el cual durante el curso del presente siglo se ha convertido en el más utilizado debido a su extraordinaria versatilidad en cuanto a forma (se puede moldear), función (uso estructural y no estructural) y economía (DE GUZMAN SANCHEZ, 2001), debido a que la tecnología con la cual se desarrolla permite la constante innovación en cuanto a materiales que lo rodean así como en procesos constructivos y funcionalidades.

En términos generales el concreto se define como la mezcla de un material aglutinante (Cemento Portland Hidráulico) un material de relleno (agregados o áridos) agua y eventualmente aditivos (en caso de que se deje mejorar una propiedad de la mezcla) (DE GUZMAN SANCHEZ, 2001). Estos materiales luego de pasar por un proceso de mezclado en estado fresco toman la forma del elemento en el cual son vertidos y posteriormente se endurecen formando un todo compacto cuya función a través del tiempo es soportar diferentes tipos de esfuerzos, compresión y flexión principalmente.

Por lo anterior las propiedades del concreto en estado endurecido dependen en gran medida de sus características en estado fresco, en especial a lo que se refiere a procesos de mezclado, colocación, compactación y terminado, es por ello por lo que es importante hablar sobre las diferentes propiedades que presenta el concreto en este estado, así como los procesos que experimenta en la transición de un estado a otro. (Sanchez de guzman, 1996)

Existen estudios a través de la historia sobre productos similares al concreto. Por ejemplo, durante el Imperio Romano se desarrolló una especie de concreto utilizando el aglomerante que llamaban “cementum”. El concreto, tal como se conoce actualmente, tuvo sus inicios en la segunda mitad del siglo XVIII, con las investigaciones sobre cales de John Smeaton y Joseph L. Vicat. A principios del siglo XIX se desarrolla el cemento Portland y, a comienzos del siglo XX, se estudian y establecen la mayor parte de las relaciones que gobiernan el comportamiento del material. Su evolución y avance es permanente, habiendo logrado adelantos tecnológicos importantes (véase Capítulo XIII). Algunos ejemplos son: El concreto precomprimido, el concreto liviano, el uso de los aditivos químicos, los concretos ultrarresistentes, los de exigente comportamiento y otros.

Los romanos usaron con gran éxito cementos puzolánicos, que son una mezcla de cal y materiales volcánicos que reaccionan entre sí y con el agua, dando origen a productos en cierto modo similares a los componentes hidratados de los cementos actuales. Algunas imponentes obras romanas de concreto se conservan en buen estado. Un ejemplo impresionante es el Panteón de Roma (27 a.c.), antiguo templo pagano convertido posteriormente en iglesia cristiana. Fue hecho con concreto aligerado, empleando piedra pómez liviana como agregado, y tiene un domo de 43,3 metros de diámetro, abierto circularmente en la cumbre. Las diferencias fundamentales entre los concretos primitivos y los actuales provienen del tipo de aglomerante. Inicialmente se usaron yeso o cal. El 31 yeso deshidratado por el calor de, por ejemplo, una fogata sencilla, absorbe nuevamente el agua y endurece. La cal, obtenida en hornos especiales o bajo la acción directa del fuego, se descarbonata, con resultados similares. Sin embargo, las características del yeso y de la cal aérea (que endurece por reacción con el anhídrido carbónico de la atmósfera) difieren de las que tienen los actuales aglomerantes, los cuales han permitido el empleo masivo del concreto («IMCYC», s. f.) (Porrero, Ramos, Grases, & Velazco, 2014).

Dentro del mundo de la construcción el concreto es, en sus diversas variantes, el material de uso más extendido en zonas urbanas. Se estima, en general, que este material es el segundo en cantidad que usa el hombre, después del agua; donde hay actividad humana organizada, hay concreto. Cada año se produce un tercio de tonelada de concreto por cada ser humano en el planeta, unos 2.000 millones de toneladas de concreto en el año 2002 (Porrero et al., 2014).

5.1.3. Materiales

5.1.3.1. Cemento

El cemento conforma el material aglomerante de la mezcla de concreto, este elemento ocupa entre el 7% y el 15% de volumen de la mezcla («IMCYC», s. f.) y aunque no tiene la mayor presencia es que logra el efecto principal del concreto y por el que se ha convertido tan importante, este material posee propiedades adherencia y cohesión que proveen a su vez la resistencia a la compresión, además de ello con adición de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto en el agua como en el aire.

El tipo de cemento principalmente utilizado para la fabricación de concreto es el cemento de tipo hidráulico y el más famoso de ellos es el cemento portland. Cabe hacer la aclaración respecto a la definición de estos dos tipos de cemento.

- **Cemento hidráulico:** Cemento que fragua y endurece por la interacción química con el agua, tanto al aire como bajo agua, a causa de las reacciones de hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables (Quiroz & Salamanca, 2006).
- **Cemento Pórtland:** Es el producto que se obtiene de la pulverización del Clinker Portland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio, este admite la adición de otros productos siempre y cuando no afecte las propiedades del cemento resultante ((NTC), s. f.).

A pesar de las definiciones que se tienen del concreto, algunas fuentes afirman que el proceso de fabricación del cemento y por ende sus componentes han cambiado a lo largo de la historia; (Porrero et al., 2014) afirma: “El cemento o Portland que se usa hoy día como conglomerante es

una cal hidráulica perfeccionada. Hidráulica quiere decir que tiene capacidad para endurecer tanto al aire como bajo el agua, sin la colaboración del anhídrido carbónico, como sucedía con las primitivas cales. Lo económico del material se debe a que las materias primas que emplea son relativamente abundantes en la naturaleza, y a las ventajas competitivas que ofrece frente a otros materiales de

construcción(Porrero et al., 2014).”

En tiempos de la Grecia y Roma antigua y hasta mediados del siglo XVIII se empleaba la cal como elemento fundamental y único aglomerante para las construcciones. Sin embargo, ésta no posee la cualidad de fraguar bajo el agua cuando se hidrata, es decir, no es hidráulica. A estos morteros se les adicionaba en determinadas circunstancias materiales de origen volcánico o materiales de alfarería triturados, obteniéndose, experimentalmente, un mejor resultado de la resistencia química frente al agua natural y de un modo especial frente al agua de mar. Por ejemplo, el "cemento romano", se obtenía mezclando dos partes de puzolana y una parte de cal apagada. Las puzolanas procedían de las cenizas volcánicas (tobas) que se encontraban al pie del Vesubio en la región de Puzzole, de donde proviene el término puzolana (Universidad de san simon, 2006).

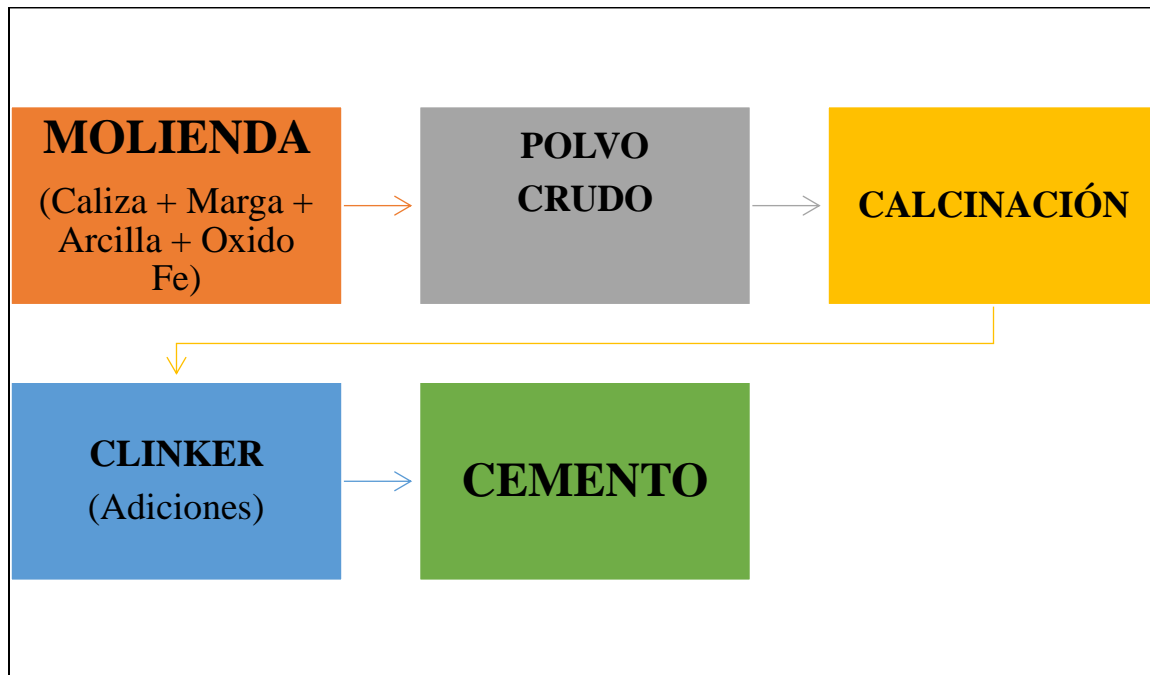
De todos los cementos desarrollados, el cemento Pórtland, patentado en Inglaterra en 1824, es el que se emplea hoy en la mayoría de las estructuras de hormigón. Su nombre deriva de la semejanza en apariencia, en el estado endurecido, con la piedra Pórtland de Inglaterra.

Las materias primas básicas para la elaboración del cemento son materiales calcáreos tales como caliza, alúmina y sílice que son encontrados como arcilla o pizarra; se ha reemplazado el yeso por marga y en los últimos años como se mencionó anteriormente se ha adicionado material puzolánico, que puede ser en su estado natural como tierra de diatomeas, rocas opalinas, esquistos, cenizas volcánicas, o material calcinado.

El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finalmente la materia prima, posteriormente mezclarla minuciosamente en cierto porcentaje y llevar a cabo un proceso de calcinación en horno rotatorio de grandes proporciones, este tipo de máquinas funcionan a una temperatura de 1300 a 1400 °C y en este rango de temperatura los materiales se sintetizan y se funden parcialmente formando las bolsas mejor conocidas como Clinker. Al terminar este proceso el Clinker se enfría y a continuación, se adiciona un poco de yeso (o material puzolánico) que se tritura hasta obtener un polvo fino o en otras palabras el producto comercial que se conoce como cemento Portland (Quiroz & Salamanca, 2006).

El proceso de fabricación del cemento tiene dos variantes, es decir industrialmente puede llevarse a cabo tanto en húmedo como en seco, la escogencia de alguno de los dos depende de factores económicos y de materiales.

Figura 5.



Nota. Proceso general de fabricación del cemento. Fuente: Elaboración propia.

- **Tipos de cemento Pórtland**

En la medida en que varían los contenidos de los diferentes componentes del cemento se modifican a su vez las propiedades de este y los beneficios que se pueden lograr con su uso, en función también de los requerimientos de las obras civiles. Es por ello por lo que pueden existir diferentes tipos de cemento con el fin de satisfacer ciertas propiedades físicas y químicas para situaciones especiales.

Tabla 8.

Tipos de cemento Pórtland. Fuente: (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, 2014).

Tipo	Denominación	Uso
Tipo 1	Cemento Pórtland tipo 1	Uso general el cual no exige propiedades especiales
Tipo 1M	-	Uso general el cual no exige propiedades especiales pero que maneja resistencias superiores a las del tipo 1.
Tipo 2	Cemento Pórtland con adiciones	Uso general en obras de hormigón expuestas a la acción moderada de sulfatos y donde se requiera mayor calor de hidratación.
Tipo 3	Cemento Pórtland con escoria de alto horno	Es el que desarrolla altas resistencias iniciales.
Tipo 4	Cemento Puzolánico	Es el que desarrolla bajo calor de hidratación.
Tipo 5	Cemento compuesto	Ofrece alta resistencia a la acción de sulfatos.
-	Cemento Pórtland con incorporadores de aire	Se les adiciona un material incorporador de aire durante la pulverización.
-	Cemento Pórtland blanco	Se obtiene con materiales seleccionados que le otorgan una coloración blanca.

Nota. Adaptado de: (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, 2014).

El tipo de cemento a utilizar en el presente trabajo de grado para la fabricación de las mezclas de concreto que serán ensayadas y analizadas será de tipo I marca Argos, de tipo estructural.

5.1.3.2.Agregados

El termino agregado hace referencia por lo general a un material inerte el cual es el resultado de la desintegración natural de las rocas y este proceso se da dependiendo el tipo de esta. Otra forma generación es por exploración y trituración manual en las denominadas canteras en donde los procesos a los que se somete le permiten tener una textura, forma, resistencia y tamaño estables.

El agregado puede clasificarse según diversos criterios como su forma, su procedencia o su tamaño y la escogencia de ellos depende del uso que se le desee dar al agregado, por lo general para diseño de mezclas de concreto se tiende a clasificar por tamaños (en mm) de las partículas de la masa de agregado. Su clasificación entonces se presenta de la siguiente forma:

- **Agregados naturales:** Formados por procesos geológicos.
- **Agregados artificiales:** Proviene de un proceso de transformación de los agregados naturales, dichos agregados artificiales son productos secundarios. Algunos de estos agregados son los que constituyen la escoria siderúrgica, la arcilla horneada, el hormigón reciclado, piedra triturada (chancada), etc.
 - Piedra triturada: Producto que resulta de la trituración artificial de rocas, piedra boleada o pedruscos grandes, del cual todas las caras poseen aristas bien definidas, resultado de la operación de trituración.
 - Escoria siderúrgica Residuo mineral no metálico, que consta en esencia de silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases, y que se produce simultáneamente con la obtención del hierro. (Universidad de san simon, 2006).

5.1.3.2.1. *Granulometría*

La granulometría en los agregados para concreto nos es más que la distribución granulométrica es decir su distribución de granos o partículas en los diferentes tamaños en la masa de agregado, dicha distribución se determina por medio de un ensayo de tamizado en el que se separan las fracciones de igual tamaño y se establece una distribución. Conocer esta propiedad es muy útil para tomar un parámetro de aceptación de la calidad del material ya que del depender las propiedades de resistencia y trabajabilidad del concreto.

A nivel de procesos, por lo general la calidad del agregado depende el proceso de tamizado y de su extracción.

Después de la excavación o explotación en la mina, los agregados del hormigón casi siempre se sujetan a un proceso de tamizado para proporcionar los tamaños adecuados para que exista una cantidad mínima de vacíos, los que serán ocupados por la pasta de cemento, la confirmación de que los tamaños deseados se encuentran presentes en el producto se realiza por el "análisis mecánico" o prueba de tamices. Dependiendo de la naturaleza de los agregados que se empleen, es posible que deba mantenerse un balance bastante preciso entre la relación de las fracciones de agregado fino y de agregado grueso, para lograr la movilidad, plasticidad y ausencia de segregación deseadas, todo lo cual se agrupa en el término general de trabajabilidad”(Universidad de san simon, 2006).

En cuanto al concreto reciclado lo ideal es que su curva se situé dentro de los límites que fijan las diferentes recomendaciones tanto para agregado natural como para agregado de concreto reciclado. El módulo granulométrico del agregado de concreto reciclado, para un mismo tamaño

máximo del agregado, presenta pequeñas variaciones dependiendo principalmente del sistema de trituración empleado y en menor medida de la calidad del concreto original.

Es sabido por la literatura que el agregado de concreto reciclado genera finos durante su manipulación debido a la aparición de pequeñas partículas de mortero que se desprenden, la presencia de estas partículas en la superficie del agregado puede originar problemas de adherencia entre éste y la pasta de cemento, además de provocar un aumento de la cantidad de agua de amasado necesaria.

Por otra parte, después de obtener la fracción gruesa en el agregado de concreto reciclado, éste sigue presentando pequeños porcentajes de arena (partículas menores de 4mm) debido a la disgregación que sufre el agregado al manipularse. Los valores más frecuentes oscilan entre 0,5-2%. Así, las recomendaciones de la Rilem y las especificaciones de Hong Kong para la utilización de agregado de concreto reciclado, establecen un límite del 5% para el contenido de partículas de tamaño inferior a 4mm en el agregado de concreto reciclado (Gutierrez, 2013).

5.1.3.3. Textura superficial

Es una de las principales propiedades que afecta la calidad del concreto en estado fresco y que es vital para una óptima resistencia a la flexotracción y a la compresión.

El hormigón puede contener agregado con una gran diversidad de características superficiales distintas desde una muy lisa hasta muy áspera y de panal y resultar en un hormigón satisfactorio. Mientras mayor sea la rugosidad superficial de los agregados mayor es la superficie de contacto con la pasta de cemento; haciendo necesaria la utilización de mayor contenido de pasta para lograr la trabajabilidad deseada, pero favorece la adherencia pasta-agregado y así mejora las resistencias. Esto es característico de los agregados de trituración. En el caso de los cantos rodados, donde su superficie es lisa, dan mejor trabajabilidad al hormigón, pero menor adherencia pasta-agregado.

5.1.3.4.Densidad y absorción

La densidad que para efectos de diseños de mezcla también es llamada gravedad específica, es la relación existente entre la densidad de un agregado y la del agua.

La densidad del agregado de concreto reciclado por lo general tiene a ser inferior a la del agregado natural, debido a la pasta de cemento que queda adherida a los granos. La densidad del agregado de concreto reciclado suele oscilar entre 2100 y 2400 kg/m³, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2300 y 2500 kg/m³, por lo que en todos los casos se pueden considerar estos agregados de densidad normal (no livianos: con una densidad cuando están sueltos y secos de 1120 kg/m³ o menos de acuerdo con ASTM C330/NTC 4045).

En las investigaciones nacionales se encuentran los siguientes valores: Densidad aparente S entre 2070 kg/m³ y 2130 kg/m³, densidad nominal entre 2520 kg/m³ y 2590 kg/m³ y densidad aparente S.S.S. entre 2270 kg/m³ y 2280 kg/m³.

Por otra parte, la absorción es una de las propiedades físicas del agregado de concreto reciclado que presenta una mayor diferencia con respecto al agregado natural, esto debido a la elevada absorción de la pasta que queda adherida a él. Los principales aspectos que influyen tanto en la densidad como en la absorción del agregado de concreto reciclado son: el tamaño de las partículas, la calidad del concreto original y las técnicas de procesado.

5.1.3.5. Desgaste en la máquina de los ángeles

Es conocido que el agregado de concreto reciclado presenta un elevado desgaste en la máquina de los ángeles ya que en el ensayo se elimina todo el mortero que queda adherido al agregado, además de la pérdida de peso propia del agregado natural. En una investigación nacional se encontró un desgaste promedio en la máquina de los ángeles del 45% frente a un 25% de la muestra patrón. En otra similar, por su parte, se encontró un desgaste promedio en la máquina de los ángeles del 40,5% frente a un 30,3% de la muestra patrón. El valor esperable del coeficiente de los ángeles del agregado de concreto reciclado puede situarse en un rango muy amplio de 25-42%, dependiendo entre otros factores del tamaño de las partículas y de la calidad del concreto original, así como del propio coeficiente de los ángeles del agregado natural que contenga (Universidad de san simon, 2006).

5.1.4. Conceptos

Es un material heterogéneo que se mezcla a partir del cemento con áridos como la piedra, gravilla, arena y grava, al igual que con agua y en ocasiones con aditivos según el tipo de

necesidad. Al mezclarse, se vuelve una pasta moldeable que, al endurecerse, tiene la característica de resistir a esfuerzo de compresión. Su empleo es habitual en obras de construcción, como son edificios, casas, puentes, puertos, canales, túneles y carreteras.

- Agregado grueso y fino

El agregado, al ser mezclado con el cemento y el agua, conforma una masa compacta llamada concreto. Es un 70% del peso total del concreto y por lo tanto el responsable de la mayoría de las características del concreto, como es la resistencia, densidad, aspecto y dureza. La diferencia entre un agregado fino y grueso es que el primero tiene partículas de forma redondas y textura suave, y necesidad de menos agua para su mezclado. Por el otro lado el agregado grueso demuestra una resistencia a la compresión alta.

- Agregado reciclado

Es agregado producido a partir del proceso de reutilización de residuos de la construcción. Pasa por los procesos de clasificaciones o limpieza, trituración primaria, trituración secundaria y trituración terciaria si son necesarias. Actualmente, este producto está siendo usado como agregado para sub-base de carretera y casas de interés social.

- Desecho

Es un material producido por la actividad humana que se necesita eliminar y se considera sin ningún valor. Son desechados en rellenos sanitarios en su mayoría. Estos productos no son aprovechados para un proceso de tratamiento adecuado para su reutilización y de esta forma evitar problemas ambientales o sanitarios.

- Reciclaje

Es un proceso que consiste en someter a una material o producto ya utilizado a un ciclo determinado para obtener un material nuevo de este. Es la utilización de un ciclo determinado para la formación de un nuevo material prima desde desechos.

- Residuos de construcción

Constituyen un amplio porcentaje del total de los residuos generados por el ser humano y son aquellos generados durante la construcción, renovación y demolición de cualquier tipo de estructura construida como centros comerciales, instituciones, puentes, calles, avenidas, diques, casas, edificios, canales de riego, entre otras.

- Aprovechamiento

Es el proceso mediante el cual se recupera los materiales provenientes de los residuos de construcción y demolición, se realiza para reincorporarse en el ciclo económico productivo en forma ambientalmente eficiente por medio de procesos como: reutilización, reusó y reciclaje.

41Siendo una acción y efecto para beneficiar algún tipo de persona, animal, ecosistema u operación. En el caso de la industrial de la construcción, el aprovechamiento de una material o producto se ve desde el beneficio económico y ambiental.

- Norma

Documento establecido por consenso y aprobado por un organismo reconocido que suministra para uso común y repetido, siendo una regla que toca seguir en un contexto determinado, en un tiempo y lugar. En el caso de las normativas de construcción estas son de tipo jurídico, ya que se establecen por los hombres de manera que se pueda ordenas su

convivencia, y su observación es impulsada por coacción de los resultados consolidados de la ciencia de la tecnología y la experiencia y sus objetivos.

5.2. Estado del arte

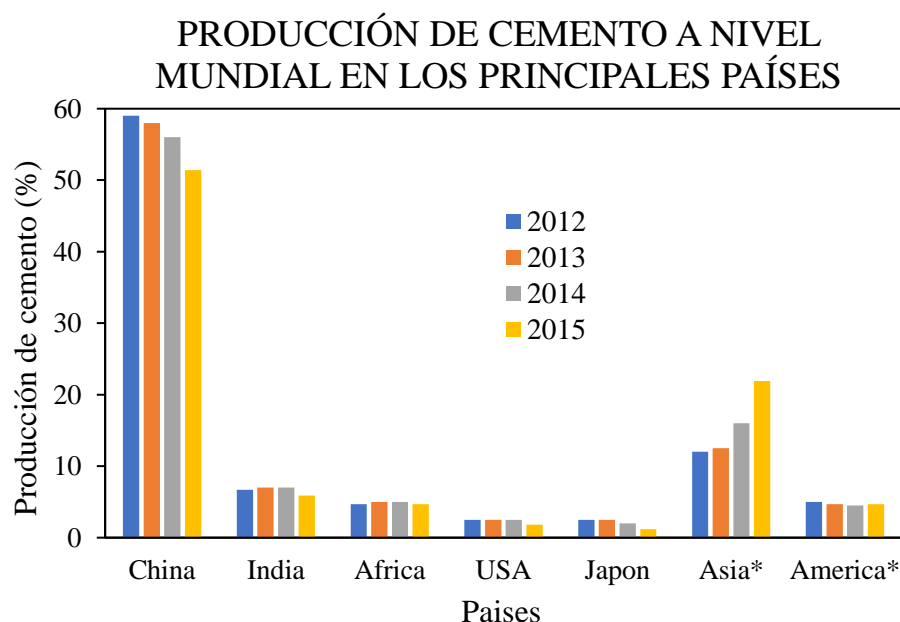
El desarrollo de toda sociedad, así como su crecimiento en los diferentes sectores productivos, económicos y de más, representan un fenómeno imparable y de ritmo constante en la mayoría de los países a nivel mundial, en especial los países desarrollados. Mas allá de los efectos positivos, este hecho se asocia, en los últimos 100 años, con un crecimiento demográfico masivo, además del advenimiento de la rápida industrialización y urbanización (Kisku et al., 2017) que genera a su vez una creciente demanda de habitas y zonas urbanas impulsando así la inversión en el sector constructivo (Behera, Bhattacharyya, Minocha, Deoliya, & Maiti, 2014a). Es de aquí donde parte una de las problemáticas principales a abordar, debido a que es precisamente esa necesidad de desarrollo traducida en construcción de todo tipo de obras de infraestructura la que acarrea graves daños en el medio ambiente y pone en riesgo la sostenibilidad de un país (R. V. Silva, De Brito, & Dhir, 2014) a través de la sobre elevada demanda de materiales de construcción convencionales (Behera et al., 2014a) que intensifica la escasez de recursos naturales (Shi et al., 2016) como por ejemplo áridos gruesos y finos necesarios para fabricar concreto, sumándosele a esto un gran número de estructuras antiguas que llegan al final de su vida útil y deben demolerse por lo que también se empieza a evidenciar un amplio problema de generación de residuos de construcción y demolición (R. V. Silva, de Brito, & Dhir, 2017).

Para explicar de forma más amplia este tema es necesario ahondar en cada uno de sus focos de manera más clara.

En primera instancia es válido analizar la huella de carbono y el impacto ambiental que tienen las principales actividades constructivas, así como la producción de materiales de construcción como el cemento. La industria de la construcción ha experimentado una expansión masiva en los siglos XX y XXI (Ürge-Vorsatz & Novikova, 2008), ocupando un lugar entre los siete sectores dominantes que más contribuyen al cambio climático por medio de las emisiones de gases de efecto de invernadero (Intergovernmental Panel on Climate change, 2007) además ocupa el segundo lugar en emisión de dióxido de carbono a nivel mundial con un porcentaje total de 33% (Ürge-Vorsatz & Novikova, 2008), el cual se ve reflejado en actividades o etapas como la extracción de materias primas el transporte, la fabricación, demolición y tratamiento de residuos (de Brito & Saikia, 2013). El sector constructivo, además, representa casi el 40% del consumo mundial de energía, el 30% del uso de materias primas, el 25% de los residuos sólidos, el 25% del uso del agua, y el 12% del uso de la tierra (United Nations Environment Programme, 2009; United Nations Environment Programme (UNEP), 2009); aportando además la obras de infraestructura como los edificios en su etapa de construcción y operación el 33% de las emisiones mundiales de gases de efecto de invernadero (GEI) (Peng, 2016; United Nations Environment Programme, 2009; United Nations Environment Programme (UNEP), 2009). Otros autores afirman que los edificios son responsables de alrededor del 50% de la energía total, así como el 50% de las emisiones totales de carbono en los países de la UE (Dimoudi & Tompa, 2008; Pataki et al., 2009). Estos y muchos otros estudios están respaldados en datos representan muchos intentos para evaluar los impactos ambientales de los edificios, sus materiales constituyentes, componentes y sistemas, y explorar cualquier oportunidad de reducir sus impactos ambientales (Chau, Leung, & Ng, 2015). En cuanto a la industria del cemento y del concreto, este último posee un consumo actual de 1m^3 por persona año (Gartner, 2004) y su

participación en el consumo de energía de una vivienda es del 65% lo que hace más vital su participación en los impactos ambientales (Gartner, 2004). Por otra parte, el cemento tiene una producción mundial de aproximadamente 4.300 millones de toneladas desde el 2014. China lidera el escalafón de producción de cemento con más de la mitad del total mundial mientras India ocupa el segundo lugar con un 7% (United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), 1992). La figura 1. Plantea una recopilación de una serie de reportes anuales que estudian la producción de cemento a nivel mundial tanto en países como continentes y que sustenta lo dicho (Cembureau, 2012, 2013, 2014, 2016).

Figura 6.



Nota. Grafica de comparación de la producción de cemento a nivel mundial. (Cembureau, 2012, 2013, 2014, 2016).

**No incluye los países de su continente que se encuentren en la gráfica.*

Es por ello que los esfuerzos actuales a nivel mundial se enfocan en formular proyectos y políticas que mitiguen los impactos ambientales del sector constructivo, por lo tanto, el trabajo respecto al medio ambiente y sostenibilidad ha sido el centro de atención en el siglo XXI (Kisku et al., 2017) (Poon, 2007).

Ahora bien, el segundo gran foco que continua con la línea del presente tema y que tiene un radio de influencia mucho más amplio es la demanda directa de recursos naturales y de materias primas para la construcción y a su vez las obras de remodelación, reconstrucción o remodelación de obras civiles, estos dos aspectos traen como consecuencia la escasez de los recursos y la contaminación debida a la producción indiscriminada de todo tipo de residuos sumado a las pocas políticas de gestión y disposición final adecuada de los mismos.

El concreto es el material de construcción por excelencia y por ende el más utilizado en la industria (Marinković, Radonjanin, Malešev, & Ignjatović, 2010). Su popularidad es gracias a sus altas propiedades mecánicas, de durabilidad y rentabilidad, así como también su versatilidad de uso y sus bajos costos de aplicación, se estima que se produce 1 tonelada de este material por cada ser humano en la tierra (Behera, Bhattacharyya, Minocha, Deoliya, & Maiti, 2014b; Marie & Quiasrawi, 2012) y representa el doble del consumo de todos los demás materiales convencionales como acero, plástico y madera (de Brito & Saikia, 2013). El concreto también llamado hormigón en algunas partes del mundo, está compuesto por diferentes constituyentes tales como materiales de unión o aglomerantes, agua, aire, agregados (ocupan aproximadamente el 60% - 75% del volumen total de concreto) y aditivos en algunos casos que se desea mejorar la propiedades de las mezclas (H.Kosmatka & L.wilson, 2011). De ahí a que la demanda creciente del concreto como material de construcción implica directamente la explotación minera de los áridos naturales la cual crea un desequilibrio ecológico de diversas formas: daña el paisaje, la biodiversidad, contamina el agua, aumenta las inundaciones, el ruido, contaminación por polvo y además genera residuos de minería (de Brito & Saikia, 2013). En la constante búsqueda por lograr la sostenibilidad en la producción de concreto, la academia, las empresas y por supuesto

los países proponen formas innovadoras en cuanto a la producción del material y el uso de agregados.

La demanda de recursos naturales y por ende la producción de residuos va muy atado al nivel de producción de cemento y de concreto, el autor («World Construction Aggregates - Industry Market Research, Market Share, Market Size, Sales, Demand Forecast, Market Leaders, Company Profiles, Industry Tre», s. f.) calcula que el concreto utiliza alrededor de 20.000 millones de toneladas de materia prima por año (agregados vírgenes) mientras otras fuentes aumentan este valor en 30.000 millones de toneladas por año (Lye, Dhir, & Ghataora, 2016). Se cual sea el valor se prevé una duplicación en la demanda de agregados en dos o tres décadas (Oikonomou, 2005), incluso se ha llegado a afirmar que este valor superará los 51.000 millones de toneladas métricas para el 2019 (Yanik, s. f.).

El término "desechos C & D" se usa generalmente para referirse a los desechos sólidos generados en el sector de la construcción. Más específicamente, la Se define como el residuo que se deriva de las actividades de construcción, renovación y demolición, incluyendo la excavación o formación de tierras, la construcción civil y de edificios, el despeje del sitio, las actividades de demolición, el trabajo en las carreteras y la renovación de edificios (Shen et al., 2004). Una cantidad significativa de residuos de C & D se genera anualmente a nivel mundial. Por ejemplo, aproximadamente 136 millones de toneladas de desechos de C & D relacionados con la construcción se generan cada año en los EE.UU., de los cuales sólo el 20-30% es reciclado (Waste & Response, 2000). En el Reino Unido, se informó que cada año alrededor de 70 millones de toneladas de materiales de C & D y suelo terminaron como residuos (Vadera et al., 2008), y la tasa de desperdicio en la industria de la construcción del Reino Unido era de 10-15% (KIER, 2008) En Australia, los residuos de C & D representan el 16-40% del total de residuos

sólidos generados (Bell, 2003). En Hong Kong, según el informe del Departamento de Protección Ambiental (EPD), en 2007 se recibieron cerca de 2.900 toneladas de residuos de C & D en vertederos por día (EPD, 2015). China produce el 29% de los residuos sólidos municipales mundiales (RSU) cada año, de los cuales las actividades de construcción contribuyen a casi el 40% (Suocheng, Tong, & Yuping, 2001)(Wang, Kang, & Tam, 2008).

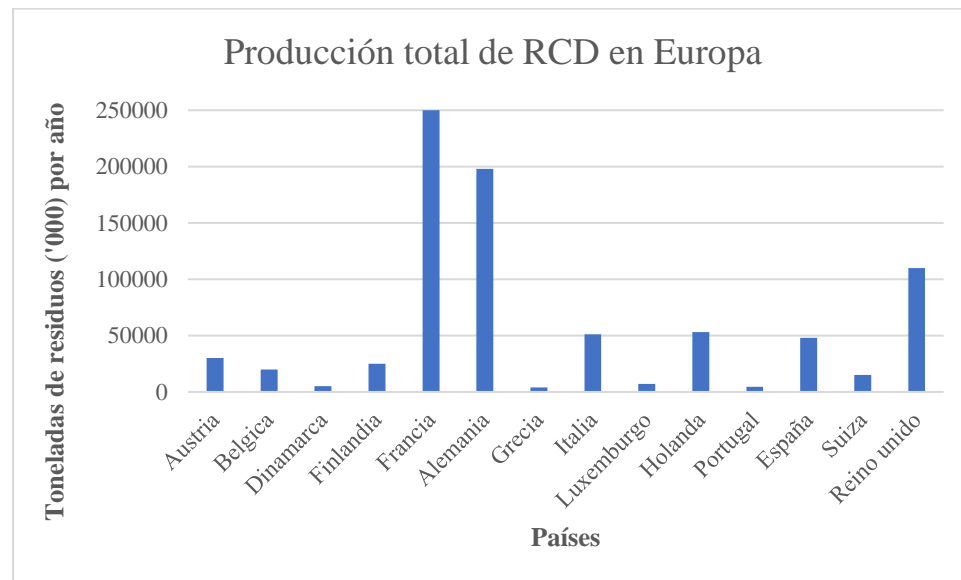
A nivel local se estima que el sector de la construcción en Bogotá ha crecido del 20% al 30% del PIB («Camacol Bogotá y Cundinamarca - Construcción Sostenible», s. f.). Lo que genera un crecimiento en la generación de los RCD. Se calcula que la Capital de Colombia produce cerca de 15 millones de ton/año de RCD (), valor que sumado con las demás ciudades del país nos coloca incluso por encima de grandes países desarrollados mencionados anteriormente. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2012)

En cuanto a la generación de residuos de construcción y demolición, La unión europea es la comunidad de países que representa una gran parte de los RCD generados nivel mundial. En 2004, 2006 y 2008, la generación total de residuos en los 27 países de la Unión Europea ascendió a 2,68, 2,73 y 2,68 mil millones de toneladas, respectivamente, además según estas estadísticas cada ciudadano de la Unión Europea produjo una media de 5,2 toneladas de residuos en 2008, de los cuales 196 kg eran peligrosos. La construcción (859 millones de toneladas o el 32,9 % del total) y la minería (727 millones de toneladas o el 27,8 % del total) son los principales sectores económicos que generaron la mayor parte de los residuos en 2008 (de Brito & Saikia, 2013; Eurostat (2011), 2011).

La comisión europea del medio ambiente por medio de su reporte (KAWANO, 2000) expone el consolidado de producción de RCD en los principales países, cabe aclarar que en

estos valores se incluyen suelos y piedras de dragado, los cuales generalmente son excluidos para las principales estadísticas y datos respecto a este tema.

Figura 7.



Nota. Estimado anual de generación de residuos C&D en Europa en 2006.

Es posible conocer que tanto han crecido los países en el factor determinante que es el nivel de reutilización y tipo de disposición final de los Residuos de Construcción y Demolición, existen fuentes muy divulgadas en el medio desde el 1999, la fuente más actual del porcentaje de aprovechamiento (European Commission Environment, 2011) y el porcentaje que representan los RCD dentro del total de residuos generados en los principales países de Europa.

Tabla 9.

Volumen de RCD tratado por los principales países de la UE en 1999. Fuente: (European Commission Environment, 2011).

País	RCD en millones de ton	% Reutilizado o reciclado	% Vertido o incinerado
<i>Alemania</i>	59	17	83
<i>Reino Unido</i>	30	45	55
<i>Francia</i>	24	15	85
<i>Italia</i>	20	9	91
<i>España</i>	13	<5	>95
<i>Holanda</i>	11	90	10
<i>Bélgica</i>	7	87	13
<i>Austria</i>	6	41	59
<i>Portugal</i>	3	<5	>95
<i>Dinamarca</i>	3	81	19
<i>Grecia</i>	2	<5	>95
<i>Suecia</i>	2	21	79
<i>Finlandia</i>	1	45	55
<i>Luxemburgo</i>	1	<5	>95
TOTAL	<u>180</u>	<u>28</u>	<u>72</u>

Nota. Adaptado de: (European Commission Environment, 2011).

Como se observa en la tabla 1, el nivel de reutilización en Europa era muy poco, debido a que la gran parte de los residuos eran vertidos en sitios de relleno. No obstante, esta comunidad de países se tomó el trabajo muy en serio, y aunque la producción de RCD ha aumentado, los niveles de reciclaje y la disminución del impacto ambiental también lo ha hecho. Los reportes más recientes de la actividad europea al respecto lo demuestran (European Commission Environment, 2011).

Tabla 10.

Volumen de RCD generado y tratado en principales países de Europa (Eurostat (2011), 2011).

País	RCD en millones de ton	% Reutilizado o reciclado	% Vertido o incinerado	% Otros tratamientos
<i>Alemania</i>	82.2	68	4	28
<i>Reino Unido</i>	44.8	86.5	-	-
<i>Francia</i>	66.6	83	6	11
<i>Italia</i>	33.8	75	25	-
<i>España</i>	27	68	16	16
<i>Holanda</i>	25.71	93	2	5
<i>Bélgica</i>	6.95	0.2	72	27.8
<i>Austria</i>	8.3	-	91	-
<i>Portugal</i>	1.2	-	49	-
<i>Dinamarca</i>	2.9	86	13	0
<i>Grecia</i>	0.8	<5	99	1
<i>Suecia</i>	1.31	49	-	-
<i>Finlandia</i>	1.5	-	-	-
<i>Luxemburgo</i>	0.6	88.4	-	-
TOTAL	<u>180</u>	<u>28</u>	<u>72</u>	

Nota. Adaptado de: (Eurostat (2011), 2011).

La composición de los RCD depende en gran medida de del país en el que se generen y de los procesos de gestión y clasificación a nivel industrial que se manejen, además de las metodologías de construcción en dicho país.

Existen numerosos estudios encargados de recopilar las diferentes investigaciones dedicadas a caracterizar los RCD y clasificar los diferentes elementos peligrosos y no peligrosos que en él se pueden encontrar. El autor (de Brito & Saikia, 2013) recopiló información de diversos autores respecto a este tema.

Tabla 11.

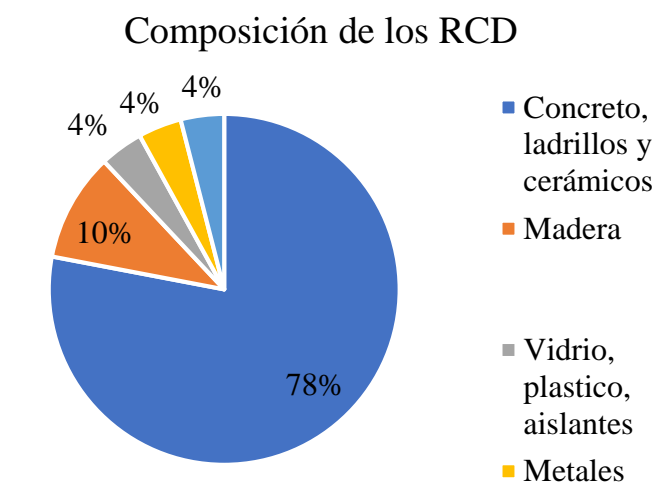
Composición de los RCD según algunos autores (de Brito & Saikia, 2013).

Materiales	Pereira (Pereira, 2002)	Costa and Ursella (Costa & Ursella, 2003)	Reixach (Reixach, Cuscó, & Barroso, 2000)	Franklin Associates (Franklin Associates & Prairie Village, 1998)
	Contenido (%)			
Concreto y cerámicos	58.3	84.3	85	24
Metales	8.3	0.08	1.8	2
Madera	8.3		11.2	42
Plástico	0.83		0.2	32
Bituminosos	10	6.9		
Otros desechos	14.2	8.8	1.8	
Total	100	100	100	100

Nota. Adaptado de: (de Brito & Saikia, 2013).

Otros autores expresan la constitución de los RCD en 5 sencillos grupos y lo expresan como se muestra en la siguiente figura.

Figura 8.

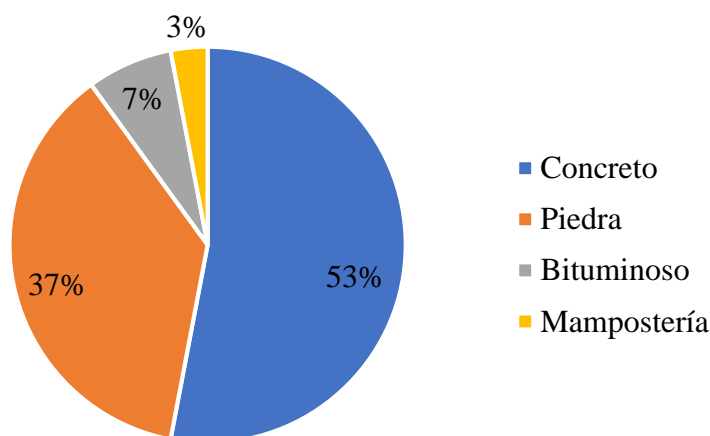


Nota. Composición de los RCD. Fuente: (Fischer, C., Werge, 2009)

Respecto a la composición de los RCD también es posible afirmar que el porcentaje de cada tipo de material o residuo depende también del tamaño de partículas de los mismos, tal como lo plantea (Belén González-Fonteboa, Martínez-Abella, Eiras-López, & Seara-Paz, 2011) quien realiza esta clasificación para 3 intervalos de tamaños de partícula de los materiales; 0-40mm, 10-25mm, y 4-12mm.

Figura 9.

Composición de los RCD 10 - 25 mm



Nota. Composición típica de los RCD. Elaboración propia.

Del mismo modo en que se estudiado y analizado el crecimiento en la producción de RCD, y la mitigación de los impactos ambientales del mismo, se han desarrollado proyectos o políticas desde el marco normativo que han regulado o estipulado de manera obligatoria en los diferentes países medidas que permiten dar una mejor gestión a los ruidos en las sus diferentes etapas, al mismo tiempo que se disminuye su producción y se aumenta el porcentaje de reciclaje de este. En Europa por ejemplo La Directiva marco sobre residuos (DMA) exige a los Estados miembros que adopten todas las medidas necesarias para alcanzar un objetivo mínimo del 70 % (en peso) de DPT para 2020 a fin de prepararse para la reutilización, el reciclado y la

recuperación de otros materiales (European Parliament and Council, 2008). Por lo tanto, se deberían encontrar más aplicaciones con valor añadido para este tipo de áridos reciclados que normalmente acaban en aplicaciones de baja calidad. Este es el caso de los áridos de hormigón reciclado, los áridos de ladrillo reciclado y los áridos mixtos reciclados, que pueden utilizarse en el proceso de construcción de edificios donde la influencia medioambiental sobre su durabilidad y las demandas de carga son considerablemente menores que en otras aplicaciones (Banjad Pečur, Štirmer, & Milovanović, 2015).

Países también destacados como Singapur en donde su meta es desviar los residuos de construcción y demolición (CDW) de los vertederos, así como exigir la obtención de materiales alternativos para reemplazar los áridos naturales, que se importan principalmente de los países vecinos. Una solución factible es producir concreto estructural utilizando agregados de concreto reciclado (RCA) derivados de CDW (Ho et al., 2015).

Siguiendo este significativo ejemplo los demás países a nivel mundial otros países del mismo y de otros continentes proponen innovadoras políticas de regulación de residuos (Youcai & Sheng, 2017), algunas partiendo del hecho básico de que cuando los vertederos son la opción de menor coste para los residuos resultantes de las actividades de construcción, incluida la demolición, la mayor parte de esos residuos se depositan en vertederos (Barritt, 2016), por lo que si se aumenta el precio de este servicio o se obliga a reutilizar cierto porcentaje de los residuos generados, las políticas tendrán mayor probabilidad de éxito.

Tabla 12.

Sistemas regulatorios destacados para la gestión de los RCD (Youcai & Sheng, 2017).

Countries	Sistemas regulatorios	Contenido principal
Alemania	Sistema de carga	Cargo por el almacenamiento de residuos C&D no tratados. Multa por el vertido aleatorio de residuos C&D
UK	Régimen fiscal	Impuesto sobre el vertido, vertido e incineración de residuos C&D
Estados Unidos	Incidencia del gobierno mientras las empresas se autorregulan.	* Basado en métodos de control dirigidos por el gobierno, mejorados por las políticas de estímulo del mercado. * El modo de propugnación mediante gobierno mientras se autorregula por parte de las empresas. e
Japón	Gestión de todo el proceso	La gestión de todo el proceso se lleva a cabo en la generación, recogida, eliminación y reciclaje de los residuos de C&D.

Nota. Adaptado de: (Youcai & Sheng, 2017).

Entrando al contexto académico que es que promotor principal de métodos innovadores de reutilizar los residuos de construcción y demolición de muchas formas, desde materiales nuevos de construcción hasta rellenos de todo tipo de pavimentos.

Actualmente existe gran avance científico en todos los campos de la gestión del RCD en toda su cadena de producto. Sobresalen resultados importantes en cuanto a caracterización cuantitativa y química de los residuos (Sérgio C. Angulo, John, Ulsen, & Kahn, 2014; del Río Merino, Izquierdo Gracia, & Weis Azevedo, 2010; Halmeman, Souza, & Casarin, 2009; LIMA & CABRAL, 2013; M. C. Limbachiya, Marrocchino, & Koulouris, 2007); en cuanto a las

propiedades físicas la gran parte de las investigaciones al respecto estudian tanto de forma directa como indirecta cada una de las propiedades que varían por tratarse de agregado de concreto reciclado y que por supuesto terminan siendo determinantes en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. Los principales requisitos que deben cumplir los agregados reciclados son tamaño máximo, presencia de contaminantes y otros requisitos de durabilidad (Tu, Chen, & Hwang, 2006), este tipo de agregados tienden a ser de textura irregular, rugosa, alargada y porosa; todo esto se ve reflejado principalmente en parámetros de absorción (Rakshvir & Barai, 2006). Principalmente se han obtenido resultados académicos importantes en el análisis de propiedades físicas tales como: Densidad y gravedad específica la cual se reportó en la mayoría de las veces por debajo de los agregados naturales, esto por la existencia de pasta cementosa porosa y menos densa en los áridos de RCD. Los agregados RCD con menos pasta de mortero tienen mayor densidad que los RCD con mayor contenido de pasta de cemento (Chakradhara Rao, Bhattacharyya, & Barai, 2011a; Corinaldesi & Moriconi, 2009; Courard, Michel, & Delhez, 2010; Eguchi et al., 2007; Poon, Kou, & Lam, 2007), a pesar de ello (Poon, Shui, & Lam, 2004) reportaron una densidad más baja que la de los agregados de RCD obtenido de concreto de alto rendimiento que el agregado RCD hecho con resistencia normal. Del mismo modo se ha hecho con propiedades como la absorción de agua (Poon et al., 2004), abrasión (R. V. Silva, de Brito, & Dhir, 2014), contracción por secado (McGinnis, Davis, de la Rosa, Weldon, & Kurama, 2017), entre muchos otros.

Se ha demostrado en diversas investigaciones que la resistencia a la compresión del concreto hecho con agregado reciclado (R. V. Silva, de Brito, & Dhir, 2015) puede variar por determinados factores como la humedad de los agregados (Poon et al., 2004), su relación A/C (Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002)(McNeil & Kang, 2013). Como es de esperar también

depende en gran medida del porcentaje de reemplazo del árido reciclado (RA) (Kisku et al., 2017), (Behera et al., 2014b). Es por ello por lo que se ha establecido que las propiedades físicas del material pueden incidir directamente en la resistencia, parámetros como resistencia al impacto, abrasión se hacen vitales.

Las investigaciones en cuanto a parámetros de resistencia a compresión giran en torno a la influencia de los porcentajes de reemplazo en variación de la resistencia la cual se ha demostrado que es menor que la del concreto fabricado con agregados naturales (Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002; Corinaldesi & Moriconi, 2010; de Brito & Alves, 2010; Hooton & Gómez-Soberón, 2003; Lovato, Possan, Molin, Masuero, & Ribeiro, 2012; Rakshvir & Barai, 2006; Topçu & Şengel, 2004; Xiao, Li, & Zhang, 2005; Zaharieva, Buyle-Bodin, Skoczylas, & Wirquin, 2003), esta reducción de resistencia debida al reemplazo por agregados de RCD puede ser desde 10% (Dr.S.R.Choudhari & Dr.A.R.Gajbhiye, 2012; B. González-Fonteboa & Martínez-Abella, 2008) , 20% en algunos casos (Nixon, 1978), en otros puede estar entre 12 y 25 % cuando se sustituía entre el 25 y 30% (Etxeberria, Vázquez, Marí, & Barra, 2007; Evangelista & de Brito, 2007; Pavón, Etxeberria, & Díaz, 2012; Rahal, 2007), incluso ha llegado a alcanzar niveles de disminución del 30% y 40 % de su resistencia a compresión (Katz, 2003; O. Rageh, Hosny, & Abdel-Rehem, 2017); en los casos más extremos se ha demostrado que este porcentaje puede disminuir hasta en un 60% (Chakradhara Rao, Bhattacharyya, & Barai, 2011b). Aunque la tendencia suele ser el comportamiento inversamente proporcional entre la resistencia a la compresión y el porcentaje de reemplazo del concreto, algunos autores han demostrado el aumento de dicha resistencia con un porcentaje de reemplazo de hasta 33% (Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002; Chakradhara Rao et al., 2011b; Evangelista & de Brito, 2007). En cuanto al nivel óptimo de reemplazo de agregado grueso reciclado por agregado grueso natural, algunos

autores coinciden en que debe ser de máximo 30% (Arora & Singh, 2017; Surya, VVL, & Lakshmy, 2013) o del el 33% (Gómez-Soberón, 2002; Li, Xiao, & Zhou, 2009; M. C. Limbachiya, 2010; M. Limbachiya, Koulouris, Roberts, & Fried, 2004). Pocos autores como

En cuanto al aprovechamiento de los RCD el más sobresaliente por supuesto es su reutilización como agregado grueso (Agregado grueso reciclado RA) para concreto, denominado concreto reciclado (CR). (Behera et al., 2014b), (R. V. Silva et al., 2017), (HUANG & ZHAO, 2009). No obstante se han desarrollado numerosos artículos, tesis de pregrado e incluso maestría en los que se proponen usos alternativos y viables para RCD, por ejemplo la reutilización de los residuos e-waste (FIGUEREDO & PADILLA, 2017; Jo, Park, & Park, 2008; Sadrmomtazi, Dolati-Milehsara, Lotfi-Omran, & Sadeghi-Nik, 2016; Senthil Kumar & Baskar, 2014) que se han vuelto de vital importancia en el actual y desarrollado mundo tecnológico, otro tipo de residuos más comunes como el PET, el vidrio o incluso material EVA, (Dias & Carvalho, s. f.; EPD, 2015; Jo et al., 2008; Letelier, Tarela, Osses, Cárdenas, & Moriconi, 2016; Sadrmomtazi et al., 2016). Conocer esta situación, no solo genera motivación para investigar incursionar más a fondo los materiales alternativos y su integración a ciclo productivo en el sector de la construcción, además de ello motivan la gran incógnita si los concretos alternativos con agregados reciclados podrán llegar a obtener propiedades similares a la de los concretos más modernos en la actualidad como los translucidos, permeables o autocompactantes (Kia, Wong, & Cheeseman, 2017; Sabău, Pop, & Oneț, 2016).

Dos factores importantes relacionados directamente con el presente trabajo investigativo es el análisis del comportamiento mecánico y el comportamiento químico y de durabilidad del concreto reciclado. Uno de las principales formas de aprovechamiento de los RCD está en su utilización como agregados para concreto, Otros autores pensando precisamente en esta forma de

aprovechamiento han estudiado el comportamiento mecánico del agregado reciclado (Bravo, De Brito, Pontes, & Evangelista, 2015), y también su durabilidad dentro de la mezcla de concreto (Levy & Helene, 2004), (S. C. Angulo, Carrijo, Figueiredo, Chaves, & John, 2010).

Sin duda alguna el agregado reciclado producto de la trituración de RCD provenientes de escombros por lo general de concreto, mampostería o mortero es el más llamativo y el que alrededor del mundo los entes normativos, científicos e ingenieros se han encargado de estudiar, por lo que esto nos lleva a evaluar el comportamiento de este tipo de agregados haciendo parte de una mezcla de concreto utilizado en diferentes tipos de construcciones como vías, elementos estructurales como columnas o vigas y elementos no estructurales como prefabricados. (Xiao & Zhang, s. f.) (Rosas Chaves, 2014)

5.3. Marco legal

Tal como se expone en el marco teórico y estado del arte del presente trabajo de grado, el desarrollo normativo técnico y legal en nuestro país respecto a la utilización, reutilización y/o gestión en general de los RCD es muy reducida y poco fundamentada, es decir no es posible establecer parámetros de medición o de aceptación y/o para productos fabricados o estructuras hechas con concreto reciclado, ni mucho menos establecer criterios máximos y mínimos de las propiedades de los agregados reciclados.

No obstante, las principales ciudades de Colombia han optado hasta el momento por intentar establecer una guías o lineamientos iniciales (no obligatorios) para desarrollar la gestión de los RCD (desde su recolección hasta su disposición y/o reutilización final) de manera correcta y que no genere un impacto considerable en el medio ambiente. Del mismo modo otras ciudades han desarrollado esta guía de gestión añadiéndola dentro de un plan de gestión de todos los

residuos sólidos en general, es decir no se aborda de forma específica en cuando a RCD se refiere.

El avance más resaltable hasta la fecha es la resolución 0472 del 28 de febrero del 2017, la cual establece unos parámetros más específicos que deben seguir todos los entes relacionados con los RCD, desde los generadores de este, hasta lo que son considerados gestores; esta normativa es regulada por los órganos ambientales competentes de cada ciudad y por supuesto a nivel nacional por el ministerio de ambiente.

5.3.1. Guía para la gestión integral de Residuos de Construcción y Demolición – Bogotá.

Esta guía realizada por la secretaría distrital de ambiente de la ciudad de Bogotá plantea una descripción completa de lo que tiene que ver con la gestión adecuada de los RCD. Inicialmente los clasifica teniendo en cuenta las etapas constructivas y los diferentes posibles tipos de materiales (orgánicos, no orgánicos, peligrosos, no peligrosos, entre otros) que pueden ser encontrados en obras de demolición o construcción. Define además una normativa específica aplicable, entre las cuales se encuentra:

- **Normativa del Orden Nacional**

- **Resolución 541 de 1994:** “Por medio de la cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación”.
- **Decreto 948 de 1995:** “Reglamenta la prevención y control de la contaminación atmosférica y protección de la calidad del aire”.

- **Decreto 1713 de 2002:** Artículo 44 “Recolección de escombros. Es responsabilidad de los productores de escombros su recolección, transporte y disposición en las escombreras autorizadas. El Municipio o Distrito y las personas prestadoras del servicio de aseo son responsables de coordinar estas actividades en el marco de los programas establecidos para el desarrollo del respectivo Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS”.
- **Ley 769 de 2002:** “Por la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre”.
- **Decreto 4741 de 2005:** “Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral”.
- **Ley 1259 de 2008:** “Por medio de la cual se instaura en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros”.
- **Decreto 2981 de 2013:** “Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo”
- **Normatividad del Orden Distrital:**
 - **Decreto 357 de 1997:** “Por el cual se regula el manejo, transporte y disposición final de escombros y materiales de construcción”.
 - **Acuerdo 79 de 2003:** Artículo 85 “Por el cual se expide el Código de Policía de Bogotá”.

- **Resolución 556 de 2003:** “Por la cual se expiden normas para el control de las emisiones en fuentes móviles”.
- **Decreto 312 de 2006:** “Por el cual se adopta el Plan Maestro para el Manejo Integral de Residuos Sólidos para Bogotá Distrito Capital”.
- **Decreto 620 de 2007:** “Por medio del cual se complementa el Plan Maestro de Residuos Sólidos (Decreto 312 de 2006), mediante la adopción de las normas urbanísticas y arquitectónicas para la regularización y construcción de las infraestructuras y equipamientos del Sistema General de Residuos Sólidos, en Bogotá Distrito Capital”.
- **Decreto 034 de 2009:** “Por el cual se establecen condiciones para el tránsito de vehículos de carga en el área urbana del Distrito Capital y se dictan otras disposiciones”.
- **Acuerdo 417 de 2009:** “Por medio del cual se reglamenta el comparendo ambiental en el Distrito Capital y se dictan otras disposiciones”.
- **Acuerdo 515 de 2012:** “Por medio del cual se modifica el Acuerdo 417 de 2009, que reglamenta el Comparendo Ambiental en el Distrito Capital”.
- **Resolución 01115 de 2012:** “Por la cual se regula técnicamente el tratamiento y/o aprovechamiento de escombros en el Distrito Capital”.
- **Resolución 715 de 2013:** “Por medio de la cual se modifica la Resolución 1115 del 26 de septiembre de 2012”.

- **Resolución 1138 de 2013:** “Por la cual se adopta la Guía de Manejo Ambiental para el Sector de la Construcción y se toman otras determinaciones”.
- **Decreto 364 de 2013:** “Por el cual se modifican excepcionalmente las normas urbanísticas del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C.”.

Además, las leyes específicas mencionadas que rigen el plan de gestión en mención, lo más importante de este es el apoyo y guía que se da a todos los entes participantes en el ciclo de vida de los RCD para el desempeño de sus funciones. Se establece un marco conceptual referente al tema de los RCD, una estructura desglosada de lo que debe tener un plan de gestión de RCD, entre ellos alcance, objetivo, información del proyecto, plano de situación de la zona de almacenamiento, acciones de socialización, entre otros aspectos que permiten reducir el impacto de este tipo de residuos y crear conciencia. Por último, este documento invita a que reglamentado o no hasta el momento la gestión adecuada de los RCD en nuestro país es responsabilidad de los constructores y de los diferentes gestores de velar por la reducción del impacto de estos en el medio ambiente y a la búsqueda constante de alternativas que controlen dicho impacto y lo mitiguen por medio de propuestas de reutilización en otros materiales, tales como el concreto reciclado.

5.3.2. **Plan de gestión integral de residuos sólidos – PGIRS 2016 – 1027 Barranquilla** (Alcaldía de Barranquilla, 2015)

El distrito especial industrial y portuario de la ciudad Barranquilla en conjunto con la secretaria de planeación de la ciudad desarrollar un plan de gestión completo de los residuos sólidos en general de esta. Este plantea antecedentes claros al respecto, así como un marco legal detallado en cuanto a gestión de residuos sólidos se refiere. Plantea en conjunto con lo

anterior líneas base las cuales deben seguir los planes de gestión de los principales entes generadores y gestores además de los objetivos y metas que estos deben proponerse cumplir, de allí se desprenden un plan de programas y proyectos que se proponen llevar a cabo para la reducción del impacto y la gestión adecuada de los residuos. Por último y más importante este plan de gestión local establece un indicio de especificaciones y/o reglamentación para tener en cuenta para el transporte, recolección y disposición final de los RCD, por supuesto este no es detallado como se desearía que fuera debido a que los RCD en este documento son un tipo de los tantos residuos sólidos generados en la ciudad de Barranquilla.

5.3.3. Resolución 0472 del 28 de febrero del 2017.

Esta resolución constituye la normativa más moderna actualmente en cuanto a la gestión de los RCD. En esta resolución expedida por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible en el cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD y se dictan otras disposiciones.

Son diversas las aplicaciones y sin duda es de gran importancia el conocimiento de este para poder llevar a cabo un adecuado procesamiento desde su recolección hasta su disposición final del RCD. Este plan de gestión tiene cierto enfoque en las construcciones civiles que es principal epicentro de generación de este tipo de residuos. Pensando en el producto de la marca ígneo hay ciertos factores dentro de esta normativa que los involucran directamente y que pueden ser de mayor importancia pensando en ello.

La resolución plantea a lo largo de todo el documento 5 puntos primordiales para la gestión de RCD (figura 1.) los cuales comprende prevención y reducción. Recolección y transporte, almacenamiento, aprovechamiento y disposición final. En estas instancias nos

incumben de manera directa el 2,3 y 4 debido a que establecen las condiciones y requerimientos básicos para cada uno de ellos, así como el manejo de los residuos en los puntos limpios y el control que se hace sobre la sedimentación en estos sitios de almacenamiento, así como la recepción y el respectivo pesaje y clasificación de los tipos de RCD para que el aprovechamiento sea o más alto posible. También se hace importante conocer la forma en la que este documento reconoce y clasifica los RCD en Colombia.

6. Diseño metodológico

Las fases del proyecto se desarrollaron de manera lógica y ordenadas, para ello cada una de estas se compone de objetivos específicos, así como de actividades para cumplirlos, además de ello es imprescindible establecer el periodo de tiempo en el cual se desarrollará cada fase y cada proceso que lo compone. A continuación, se describe cada uno de ellos.

I. PRIMERA FASE: ANÁLISIS PRELIMINAR Y OBTENCIÓN DE MATERIALES (6 semanas).

Esta fase consiste en hacer una completa recolección investigativa de los avances y eventos más importantes en la academia realizados en pro de la innovación referente al concreto reciclado con Residuos de Construcción y Demolición, paralelo a ello se desarrolló un inventario de equipos y materiales necesarios para el desarrollo de las diferentes pruebas que requiere el proyecto, posterior a ello fue de vital importancia una cotización al respecto.

OBJETIVO: Definir, delimitar y justificar la problemática del trabajo de grado, soportando está en una revisión bibliográfica exhaustiva referente a todo lo relacionado con la utilización de áridos reciclados en la fabricación de concreto.

ACTIVIDADES

1.1. Definir el alcance del proyecto y delimitar espacial y temporalmente la problemática del trabajo de grado. (Mes de inicio 1 – mes de finalización 1).

1.2. Buscar, recolectar y organizar todo el material literario (artículos científicos, conferencias, libros, reportes, etc.) referente a la temática principal del proyecto de grado siguiendo a su vez un análisis y sistematización lógica de la misma para que pueda ser utilizadas de la mejor manera en las fases siguientes. (Mes de inicio 1 – mes de finalización 2).

1.3. Definir la metodología a utilizar para la obtención del agregado de concreto reciclado, es decir desde su recolección hasta su procesamiento. (Mes de inicio 1 – mes de finalización 1).

1.4. Levantar oficialmente todas las cotizaciones necesarias correspondientes a elaboración del concreto, procesamiento del material reciclado, obtención de materiales y hace solicitud a posibles patrocinadores del proyecto. (Mes de inicio 1 – mes de finalización 2).

1.5. Finalización de acuerdos con empresa o empresas patrocinadoras y obtención y almacenamiento de materia prima. (Mes de inicio 2 – mes de finalización 2).

PRODUCTOS Y ENTREGABLES

1. Soporte de cotizaciones de materiales, herramientas y equipos necesarios para el proyecto.
2. Documentación requerida para realización de acuerdo con empresa o empresas patrocinadoras.
3. Protocolo de procesamiento del material reciclado.
4. Soporte de compra de los materiales.
5. Documentación referente a la revisión bibliográfica.

II. SEGUNDA FASE: DISEÑO DE MEZCLA Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES. (8 semanas).

Esta fase comprende sencillamente a la caracterización de los materiales obtenidos para la elaboración del concreto, posteriormente con los parámetros y propiedades obtenidas se realizará el diseño de mezcla de los tres tipos de concretos a realizar en concordancia con el método de diseño de mezcla escogido.

OBJETIVO: Caracterizar los materiales y diseñar las diferentes mezclas de concreto.

ACTIVIDADES

2.1. Indagar y escoger en las diferentes normativas a nivel nacional e internacional el método de diseño de mezclas a emplear. (Mes de inicio 1 – Mes de finalización 1). (Mes de inicio 2 – mes de finalización 3).

2.2. Realizar ensayos de caracterización a los agregados pétreos convencionales, el polvo de cemento y el agregado reciclado. (Mes de inicio 1 – Mes de finalización 2). (Mes de inicio 2 – mes de finalización 4).

2.3. Efectuar y describir el procedimiento paso a paso para el diseño de las mezclas de concreto según la metodología escogida. (Mes de inicio 1 – Mes de finalización 1). (Mes de inicio 3 – mes de finalización 4).

PRODUCTOS Y ENTREGABLES

1. Resultados de ensayos de caracterización de materiales.

2. Cantidades finales y dosificación de materiales para las mezclas de concreto a realizar.

III. TERCERA FASE: ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO Y ENDURECIDO. (5 semanas).

Esta fase comprende la etapa experimental del trabajo de grado, la cual consiste en la realización de los ensayos al concreto en estado fresco (prueba de asentamiento en el cono Abrahams) y en estado endurecido (prueba de resistencia a compresión y resistencia a la flexión) paralelo a ello se estarán fabricando los dos tipos de probeta (cilindros y viguetas) para poder realizar las pruebas mecánicas en estado endurecido.

OBJETIVO: Realización de pruebas al concreto en estado fresco y fabricación de probetas para ensayos mecánicos en estado endurecido.

ACTIVIDADES

- 3.1. Toma de muestras de concreto fresco. (Mes de inicio 4 – mes de finalización 4).
- 3.2. Determinar las propiedades de los concretos fabricados en estado fresco. (Mes de inicio 4 – mes de finalización 4).
- 3.3. Fabricación de probetas para pruebas mecánicas. (Mes de inicio 4 – mes de finalización 5).
- 3.4. Realización de pruebas mecánicas a los concretos, teniendo en cuenta los diferentes tiempos de curado de estos.
- 3.5. Registro y cálculos básicos de los resultados obtenidos. (Mes de inicio 4 – mes de finalización 5).

PRODUCTOS Y ENTREGABLES

1. Caracterización de las mezclas de concreto en estado fresco y endurecido.
2. Material fotográfico correspondiente a la elaboración del concreto, ensayos y probetas.

IV. CUARTA FASE: ANÁLISIS FINAL. (9 semanas).

Esta fase comprende el análisis e interpretación exhaustiva de los resultados de los ensayos realizados, esto con el fin de comprobar hipótesis, comparar resultados con otros autores y elaborar conclusiones el respecto. Paralelo a ello se redactará el documento final del trabajo de grado y el artículo científico.

OBJETIVO: Formular hipótesis claras respecto al objetivo del proyecto y extraer la información necesaria para la realización del artículo científico que contribuya a la academia en el desarrollo de este tema.

ACTIVIDADES

4.1. Estudiar la influencia del agregado reciclado en las propiedades del concreto en estado fresco. (Mes de inicio 5 – mes de finalización 6).

4.2. Analizar de igual forma la influencia en cuanto a parámetros físico – mecánicos del agregado reciclado en el concreto en estado endurecido. (Mes de inicio 5 – mes de finalización 6)

4.3. Comprobar hipótesis y comparar resultados con otros autores. (Mes de inicio 6 – mes de finalización 7).

4.4. Formulación de conclusiones.

4.5. Redacción del documento final. (Mes de inicio 5 – mes de finalización 7).

4.6. Redacción del artículo científico. (Mes de inicio 7 – mes de finalización 7).

PRODUCTOS Y ENTREGABLES

1. Informe final.

2. Artículo científico.

7. Programa experimental

7.1. Selección de materiales

Para la selección de materiales se tuvieron en cuenta dos aspectos principales:

- Mayor calidad posible de los materiales
- Idoneidad y relación con materiales típicos usados para la fabricación de concreto en la ciudad de Barranquilla.

En el caso del agregado reciclado que se utilizaría como reemplazo del agregado natural se seleccionaron residuos de construcción y demolición procedentes de pavimento rígido en vía urbana de tránsito bajo en la ciudad de Barranquilla. Esto teniendo en cuenta que este concepto de reutilización de RCD viene desde finales de la Segunda Guerra Mundial [1] siendo el uso y aplicación más común la construcción de pavimentos.

Los materiales seleccionados y utilizados para la fabricación de las muestras de concreto fueron:

Tabla 13.

Características generales de materiales. Fuente: Elaboración propia.

MATERIAL	PROCEDENCIA	OBSERVACIÓN
Cemento estructural	Marca Argos	Presentación 42,5 Kg. Provista por empresa Match Overseas S.A.S.
Agregado grueso natural	Cadena de comercio de construcción Sodimac	Tamaño Máximo nominal 3/4"
Agregado grueso reciclado	Demolición de pavimento vía urbana de Barranquilla	Tamaño máximo nominal 3/4" conformado por tamizado.
Agregado fino natural	Cadena de comercio de construcción Sodimac	

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Figura 10.



Nota. Recolección y selección de agregado reciclado. Fuente: Propia.

7.2. Procesamiento del agregado reciclado.

La gestión industrial de los Residuos de Construcción y Demolición a pesar de que es un proceso ampliamente conocido gracias a las investigaciones y avances en este tema no es tan común en nuestro país debido a que son muy pocas las empresas que se dedican a la recolección, clasificación y reciclaje de todos y cada uno de los residuos que pueden ser generados de actividades constructivas y de demolición. Lo anterior se debe a que lograr rentabilidad en este tipo de actividad económica es algo complejo y que no corresponde al tema del presente trabajo de grado.

Es por ello por lo que para poder obtener a partir de residuos de concreto de demolición partículas trituradas para su utilización como agregado grueso en concreto es un proceso que debe llevarse de forma manual con la ayuda de herramientas permitan obtener el producto final requerido.

El proceso manual llevado a cabo con ayuda de terceros voluntarios para poder obtener el agregado reciclado consistía en los siguientes pasos:

7.2.1. Recolección y transporte de los residuos de demolición.

En esta etapa se estableció contacto con una Ingeniera Civil quien trabaja para la alcaldía de la ciudad de Barranquilla en obras de reparcheo de vías urbanas de la misma con el fin autorizar la recolección de una parte de los residuos los cuales ellos entregan a la entidad sanitaria de la ciudad (TRIPLE AAA) para que ellos dispongan de ella.

Esta recolección se llevó a cabo de manera informal, es decir no se tramito ninguna clase de permiso especial, y el carro utilizado para su transporte fue una camioneta particular. Esto porque en nuestro país aún no se establecen normas claras de quienes y como pueden obtener este tipo de residuos para fines de reutilización y/o disposición final.

La cantidad recolectada de material aproximadamente $1,5 \text{ m}^3$ tomando como referencia el volumen del platón de la camioneta el cual fue ocupado hasta el tope en sus tres dimensiones.

Figura 11.



Nota. Residuos de demolición de pavimento recolectados y obtención de agregado grueso reciclado. Elaboración propia.

7.2.2. Clasificación inicial

A pesar que todos los residuos recolectados son de demolición de pavimento, es decir, son residuos netamente de concreto; se efectúa una clasificación inicial con el fin de constatar que el residuo recolectado no se mezcló con residuos de otra clase, además de eliminar superficialmente de forma manual los residuos finos que por lo general estos traen adheridos, por ultimo esta clasificación inicial también sirve para descartar aquellos bloques de pavimento o residuos que tienen una humedad muy alta o tienen presencia superficial visual de residuos orgánicos.

7.2.3. Trituración inicial

Esta trituración inicial consiste en tomar cada bloque o residuos de pavimento y triturarlo manualmente con ayuda de un mazo con cabeza de hierro reduciéndolo a cantidades (partículas granulares) pequeñas visualmente clasificadas en tamaños entre 2.36mm y 25.4mm y con textura, forma y conicidades similares a las de un agregado grueso natural. Esta etapa requirió de un número aproximado de tres personas para hacerlo más rápida y eficientemente, además se llevó a cabo con las medidas de limpieza y cuidado necesarias para evitar que los residuos triturados se mezclan con otra clase de residuos no aptos, así como las medidas de seguridad también necesarias para tal fin.

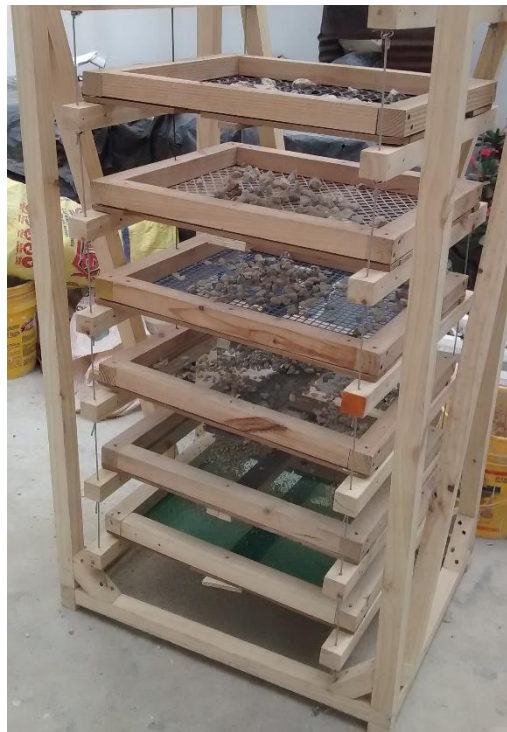
7.2.4. Tamizado principal

El tamizado principal se lleva a cabo con el fin de descartar o despreciar las partículas que excedan los límites de tamaño provistos para el diseño de mezcla, es decir, en este caso el tipo de agregado que se desea obtener a partir de los residuos es de tamaño máximo nominal 19mm (o 3/4") lo que significa que tamaños por encima de 1" (que sería su tamaño máximo) y por debajo de la abertura 2.36mm (abertura No 8) no serían aptos para la masa de agregado grueso que se utilizara en la fabricación del concreto.

Este tamizado, tanto los principales con el secundario se llevan a cabo con ayuda de una maquina tamizadora de accionamiento manual diseñada y construida por el Diseñador Industrial Carlos Gutiérrez líder del proyecto IgNEO, el cual fue el principal patrocinador del presente trabajo de grado.

Dicha maquina está compuesta por una serie de tamices distribuidos verticalmente estando arriba la abertura mayor de tamiz (1 ½”) y abajo la de abertura menos (No 8), esto tamices son hechos con marcos de madera y sus aberturas tienen los tamaños provistos por la norma correspondiente con una tolerancia de +- 5mm.

Figura 12.



Nota. Máquina de tamizado diseñada por Carlos Gutiérrez y construida en la empresa MATCH OVERSEAS S.A.S. (Dueña de la marca IgNEO). Fuente: Propia.

7.2.5. Trituración secundaria

La trituración manual secundaria se lleva a cabo con aquellas partículas de agregado reciclado resultante del tamizado principal por exceso, es decir, todas aquellas partículas mayores a una pulgada. Este grupo de agregado es el único puede ser triturado nuevamente con el fin de obtener tamaños de partículas dentro del rango especificado. Cabe aclarar que las partículas obtenidas por defecto, es decir las menores a 2.36mm no pasan por ningún otro proceso adicional porque son partículas muy finas no aptas para el tipo de concreto que se desea diseñar; por lo anterior y para efectos del presente trabajo de grado este grupo de agregados resultantes se dispone en algún sitio reglamentado, sabiendo que incluso este tipo de residuos finos también pueden ser reutilizado pero que no aplica para los fines de esta investigación.

7.3.Caracterización de materiales.

7.3.1. Descripción general.

7.3.1.1.Agregado grueso natural

El agregado grueso natural utilizado corresponde al distribuido por la principal cadena de almacenes para la construcción de la ciudad y por ende uno de los más utilizados. Este agregado grueso posee las siguientes características generales.

Tabla 14.

Características generales del agregado grueso natural. Fuente: propia.

ÍTEM	AGREGADO GRUESO NATURAL (AGN)
Origen	Arroyo de piedra
Proporcionado por	Sodimac Colombia

TMN	3/4"
Denominación popular	Gravilla
Apariencia	Limpia y superficialmente seca.
Presentación	Bolsa de 30- 35 Kg

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Figura 13.



Nota. Muestra de agregado grueso natural. Fuente: propia.

7.3.1.2. Agregado grueso reciclado

El agregado grueso reciclado se obtuvo del procesamiento (trituración) de residuos de demolición de concreto obtenido en una obra de reparcho en vía urbana de bajo tránsito de la ciudad de Barranquilla. Las características específicas de este tipo de residuo son desconocidas ya que su proceso de obtención en primera instancia fue informal y además de ello el personal que trabaja en dicha vía aparte de ser joven, no posee el conocimiento histórico del pavimento, por ende, no fue posible obtener la información de la edad del pavimento un su módulo de rotura al momento de su fabricación, por ultima y tercera instancia la edad de la vía tampoco facilita la obtención de estos valores.

Las características generales del material fueron:

Tabla 15.

Características generales del agregado grueso reciclado. Fuente: propia.

ÍTEM	AGREGADO GRUESO RECICLADO (AGR)
Origen	Pavimento rígido
Proporcionado por	Obra de reparcheo de la alcaldía de B/quilla
Largo x ancho de los bloques (residuos)	10 – 40 cm y 5 -15 cm
Denominación popular	Escombros de pavimento
Apariencia	Sucia, con mucho material fino e incluso húmeda en algunos casos.
Espesor	5 – 10 cm

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Figura 14.



Nota. Bloques de agregado grueso reciclado. Fuente: propia.

Figura 15.



Nota. Ubicación del sitio de recolección del residuo de demolición de pavimento rígido. Fuente: Google maps.

7.3.1.3. Agregado fino

El agregado fino es procedente de la cantera de Santo Tomas y distribuido por la gran parte de las ferreterías y almacenes de cadena de construcción de la ciudad. Este tipo de agregado fino por lo general tiende a ser de grano un poco grueso de lo normal, por lo que se esperaría que el módulo de finura resultara un valor alto en consideración con el promedio.

La humedad de este tipo de agregados depende en gran medida de las condiciones del entorno en las que sea almacenado por lo que influye directamente el almacén, ferretería, u otros que la distribuyan y/o comercialicen. Las características generales de este agregado son:

Tabla 16.

Características generales del agregado fino natural.

ÍTEM	AGREGADO FINO (AF)
Origen	Cantera de Santo Tomas
Proporcionado por	Almacenes de construcción Sodimac Barranquilla
Condición de humedad superficial	Seca
Apariencia	Arena limpia, bien gradada.
Presentación	Sacos entre 25 y 50 Kg

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Figura 16.

*Nota. Arena de Santo Tomas. Fuente: Google.*

7.3.1.4.Cemento

El cemento utilizado para la elaboración del concreto fue cemento portland de uso estructural de la Marca Argos. Según su ficha técnica este cemento es especial para la producción de concretos estructurales tales como los destinados para vigas, columnas, losas, muros y cimentaciones en todo tipo de edificaciones y obras de infraestructura. Además de ello cumple

con la norma técnica colombiana NTC 121 (tipo UG) y la Norma Americana ASTM C-1157 (tipo GU).

Las características generales del cemento estructural utilizado son:

Tabla 17.

Características generales del cemento de uso estructural. Fuente: propia.

ÍTEM	CEMENTO DE USO ESTRUCTURAL
Marca	Argos
Proporcionado por	MATCH OVERSEAS S.A.S. (A través de su marca IgNEO)
Presentación	42,5 kg

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Según su ficha técnica, este tipo de cemento cuenta además con las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 18.

Especificaciones técnicas del cemento de uso estructural Argos. Fuente: (Argos, 2017)

PARÁMETROS FÍSICOS		Norma de ensayo	NTC 121 TIPO UG	ASTM C-1157 TIPO GU	ESPECIFICACIÓN ARGOS
Finura	Blaine, mín. (cm ² /gr)	NTC 33	A	A	A
	Retenido Tamiz 45 µm (%)	NTC 294	A	A	A
Cambio de longitud por autoclave expansión máx. (%)		NTC 107	0.8	0.8	0.8
Tiempo de fraguado, Ensayo de Vicat	No menos de, minutos	NTC 118	45	45	70
	No más de, minutos	NTC 118	420	420	330
Expansión de barras de mortero a 14 días, máx. (%)		NTC 4927	0.02	0.02	0.02
RESISTENCIA MÍNIMA A LA COMPRESIÓN, (MPa)					

3 días	NTC 220	8	13	21
7 días	NTC 220	15	20	28
28 días	NTC 220	24	28	36.6

Nota. Adaptado de: (Argos, 2017).

Figura 17.



Nota. Bolsa de cemento de uso estructural Argos. Fuente: (Argos, 2017)

7.3.2. Granulometría

La granulometría del agregado grueso pretende determinar la composición de granos por tamaños de la masa de agregado grueso que representan la cantidad total a utilizar. Para hacer efectivo el análisis granulométrico la norma ASTM C136-14, ofrece el procedimiento para realizar el método de ensayo cuyo objetivo es determinar dicha composición granulométrica y otros valores adicionales como el Tamaño máximo el cual corresponde a la abertura del tamiz que permite el paso del 100% del material y el tamaño máximo nominal (TMN) el cual es el tamiz inmediatamente superior aquel que retiene el 15% o más del total de la muestra, el TMN

además indica el tamaño promedio de partículas más grandes que componen la muestra (FIGUEREDO & PADILLA, 2017). Una vez obtenido estos valores y la distribución de tamaños de partícula de la masa de agregado grueso, esta es expresada mediante un tipo de gráfica denominado curva granulométrica, esta curva puede ser interpretada con la ayuda de la norma ASTM C33-16 la cual establece parámetros normativos más específicos y técnicos que permiten establecer criterios de aceptación o rechazo del tipo de material que se está utilizando así ajustar los criterios de selección de materiales a tener en cuenta para el desarrollo de la investigación.

Para la caracterización granulométrica de los dos tipos de agregados grueso y el agregado fino utilizado en la fabricación de las muestras de concreto normal y concreto reciclado se realizó el procedimiento de ensayo descrito en la norma ASTM C136 -14, el cual arrojó los siguientes resultados:

7.3.2.1. Agregado grueso natural

La masa utilizada para el ensayo granulométrico fue de 8000 gr, la cual se encuentra dentro del rango de muestra de ensayo establecido por la norma ASTM C136-14. Este material uno de los más comúnmente utilizado para la construcción en la Ciudad, debido a que la cadena de almacenes que los distribuye es líder a nivel nacional. Del procedimiento realizado con base en la norma anteriormente mencionada se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 19.

Resultados obtenidos en el ensayo granulométrico a la gravilla. Fuente: propia.

GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO NATURAL					
Abertura del tamiz	Masa retenida (W)	Retenido	Acumulado	Pasa	
<i>Desig</i>	<i>mm</i>	<i>g</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
1"	25.4	0	0.00	0.00	100.00

3/4"	19.1	1800	22.50	22.50	77.50
1/2"	12.5	2800	35.00	57.50	42.50
3/8"	9.5	1700	21.25	78.75	21.25
No 4	4.75	1350	16.88	95.63	4.38
No 8	2.36	50	0.63	96.25	3.75
Fondo		300	3.75	100.00	0.00
TOTAL		8000	100.00		

Tabla 20.

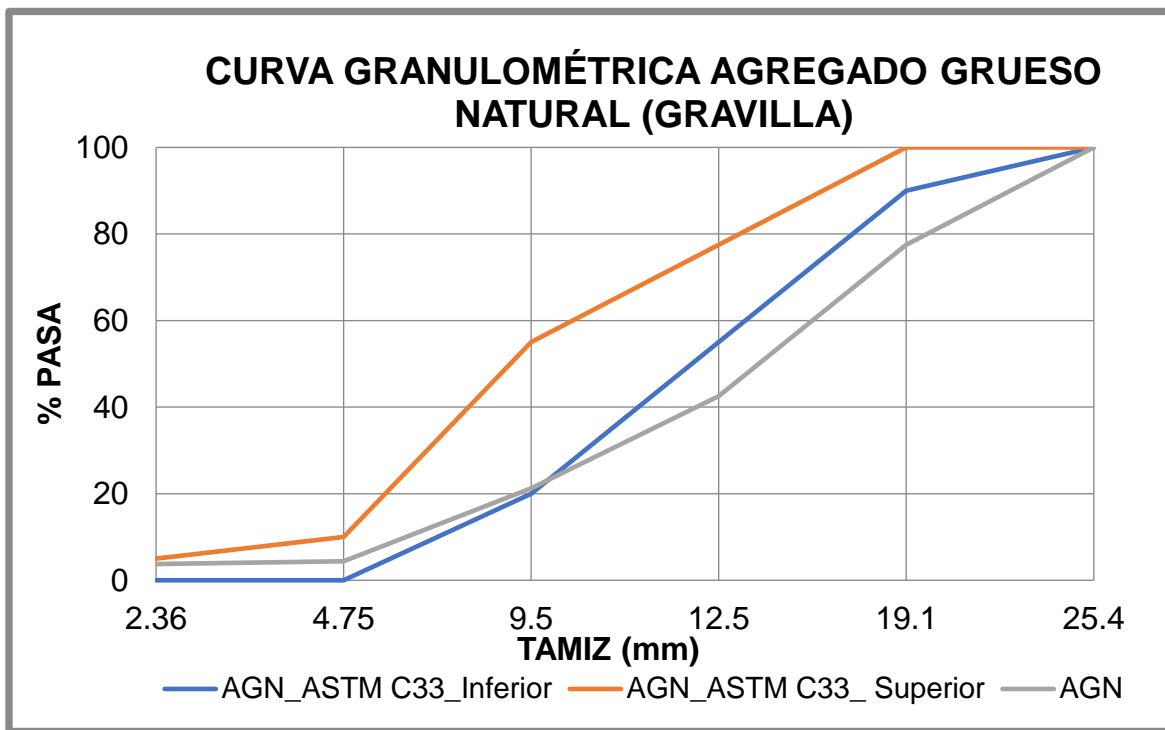
TM Y TMN obtenidos en el ensayo granulométrico a la gravilla. Fuente: Propia.

	<i>mm</i>	<i>Tamiz</i>
<i>Tamaño máximo (TM)</i>	25	1"
<i>Tamaño máximo nominal (TMN)</i>	19	3/4"

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Como se mencionó anteriormente, en ensayo granulométrico permitió obtener la siguiente curva granulométrica la cual fue comparada con los valores máximo y mínimos permitidos por la ASTM C 33-16 en la curva No 67 Tabla 2 de la misma.

Figura 18.



Nota. Curva granulométrica del agregado grueso natural (Gravilla).

Como se puede observar en la figura anterior el agregado grueso estudiado no se acopla totalmente dentro de las curvas de referencia por lo que no cumple con la norma ASTM C33-16, no obstante, debido a que este tipo de material grueso es muy representativo del tipo de agregado utilizado para la construcción en la ciudad de barranquilla y la región caribe se procede a realizar la investigación con este material.

7.3.2.2. Agregado fino

Para la caracterización granulométrica del agregado fino se utilizó la misma norma que para el agregado grueso. Un parámetro importante de agregado fino que surge de este ensayo es el módulo de finura el cual se obtiene dividiendo la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices utilizados y posteriormente dividiéndolos entre 100. Cabe aclarar que

este ensayo se llevó a cabo con los elementos y tamices convencionales establecidos por la norma.

Los resultados obtenidos en el ensayo para una masa inicial de 540 gr se muestran a continuación:

Tabla 21.

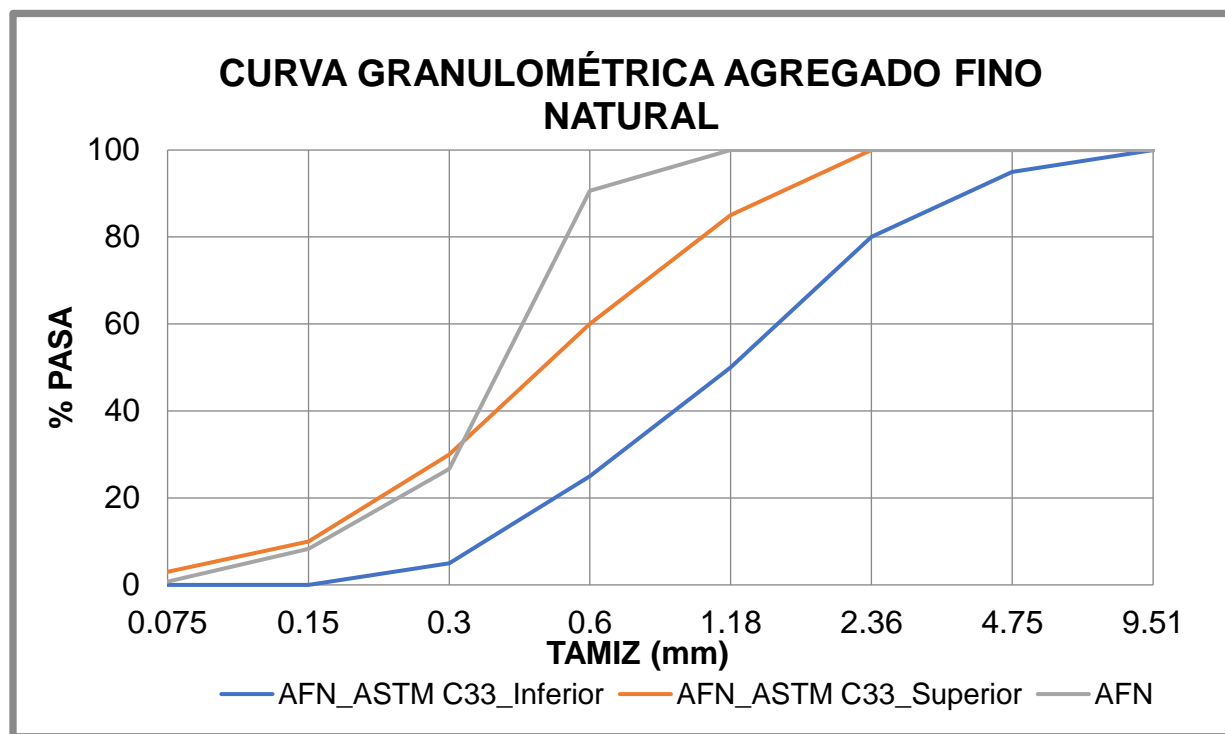
Resultados obtenidos en el ensayo granulométrico al agregado fino (Arena). Fuente: propia.

GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO FINO					
Abertura del tamiz		Masa retenida (g)	Retenido	Retenido acumulado	Pasa
<i>Desig</i>	<i>mm</i>		%	%	%
3/8"	9.51	0	0.00	0.00	100.00
No 4	4.75	0	0.00	0.00	100.00
No 8	2.36	0	0.00	0.00	100.00
No 16	1.18	0	0.00	0.00	100.00
No 30	0.6	50	9.40	9.40	90.60
No 50	0.3	340	63.91	73.31	26.69
No 100	0.15	98	18.42	91.73	8.27
No 200	0.075	40	7.52	99.25	0.75
Fondo		4	0.75	100.00	0.00
TOTAL		532	100.00		

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

En la figura 2 se muestra la curva granulométrica obtenida para el agregado fino (Arena de Santo Tomas).

Figura 19.



Nota. Curva granulométrica agregado fino natural – Arena de Santo Tomas.

En el gráfico puede apreciarse que la granulometría obtenida no cumple con lo establecido por la norma, de igual manera se decidió a realizar las muestras para la investigación con este material debido a que es el más comúnmente utilizado en la región Caribe Colombiana por lo que asemejaría de mejor manera las condiciones reales de fabricación de concreto en la ciudad.

7.3.2.3. Agregado grueso reciclado de residuos de demolición

Para llevar a cabo el ensayo granulométrico a los agregados gruesos provenientes del procesamiento de residuos de construcción y demolición más conocidos como agregados gruesos reciclados, no existe una norma nacional de referencia por lo que para tal fin se tomaron las mismas normas guía de la ASTM y se dio trato al material reciclado como material grueso natural. Por lo anterior, los resultados obtenidos luego del análisis granulométrico fueron:

Tabla 22.

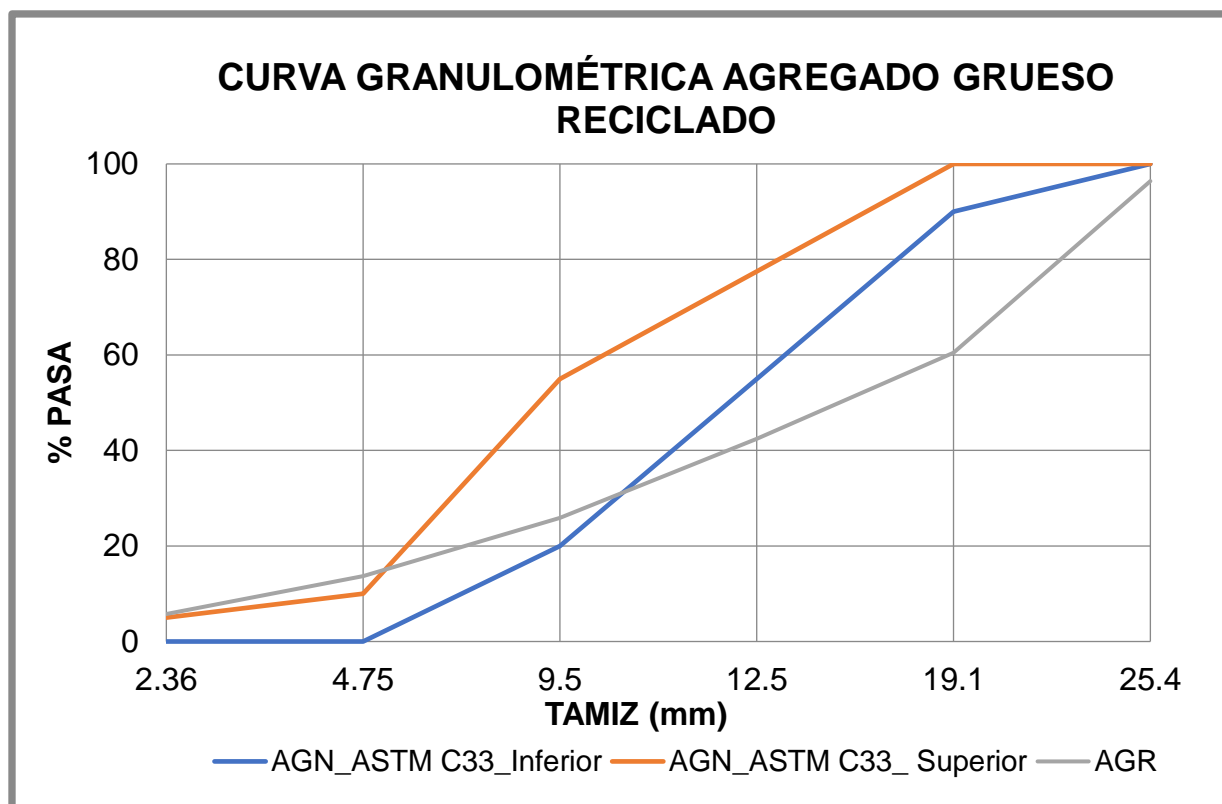
Resultados obtenidos en el ensayo granulométrico al agregado grueso reciclado.

GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO RECICLADO					
Abertura del tamiz		Masa retenida (W)	Retenido	Retenido acumulado	Pasa
<i>Desig</i>	<i>mm</i>	<i>g</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
1"	25.4	250	3.60	3.60	96.40
3/4"	19.1	2500	35.97	39.57	60.43
1/2"	12.5	1250	17.99	57.55	42.45
3/8"	9.5	1150	16.55	74.10	25.90
No 4	4.75	850	12.23	86.33	13.67
No 8	2.36	550	7.91	94.24	5.76
Fondo		400	5.76	100.00	0.00
TOTAL		6950	100.00		

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Del mismo modo fue obtenida la curva granulométrica correspondiente al ensayo realizado a este tipo de agregado reciclado.

Figura 20.



Nota. Curva granulométrica del agregado grueso reciclado.

7.3.3. Masa Unitaria

El termino masa unitaria es ampliamente conocido en lo relacionado con la tecnología del concreto y además necesario para llevar a cabo un diseño de mezcla ideal. Hace referencia a la relación existe entre la masa de un material y el volumen que ocupa este en un recipiente de dimensiones ya conocidas. Esta propiedad se determina por medio de la norma NTC 92 la cual es equivalente a la ASTM C29, en ella se describe un procedimiento completo de ensayo muy sencillo para poder calcular el valor de la Masa unitaria la cual se puede ser suelta y compactada; este valor nos indica el volumen natural de vacíos que posee el agregado respecto a su forma, textura, dimensiones de partículas, entre otras.

La dimensión del recipiente empleado para el ensayo de masa unitaria fueron las siguientes.

Tabla 23.

Dimensiones del recipiente para ensayo de masa unitaria.

ÍTEM	VALOR
Diámetro	0.15 m
Altura	0.30 m
Volumen	0.00556 m ³

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

El volumen de recipiente mostrado en la tabla anterior se determinó por medio de la fórmula de volumen de un cilindro Ec. (1):

$$V = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * h \quad (1)$$

Siendo: $D = \text{Diámetro} / h = \text{Altura}$

Los resultados obtenidos luego de efectuar el procedimiento de ensayo de la norma ASTM C29 para agregado grueso natural y agregado grueso reciclado fue:

Tabla 24.

Datos y resultados del ensayo de masa unitaria en agregados gruesos.

MASA UNITARIA COMPACTADA EN AGREGADOS			
	Agregado 50/50	Agregado reciclado	Agregado Natural
Masa del agregado + molde		10 kg	9.5 Kg
Masa del molde		1 kg	1 kg
Volumen del molde		0.00556 m ³	0.00556 m ³
MUC	1573.74 Kg/m ³	1618.71 Kg/m ³	1528.78 Kg/m ³

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

7.3.4. Densidad relativa y absorción

Es conocido como densidad a la relación existente entre la masa y el volumen de un agregado, esta propiedad es proveniente del origen del agregado. En el caso del agregado grueso

reciclado viene dada por la densidad del residuo de demolición el cual fue procesado, así como del tipo de procesamiento y trituración que se dé. El procedimiento de ensayo para determinar estas propiedades está descrito por las normas NTC 237 (equivalente a la ASTM C128) y la NTC 176 (Equivalente a la ASTM C127-93).

El agregado grueso reciclado fue ensayado para determinar esta propiedad con la misma normativa especificada para el agregado grueso Natural lo cual conlleva a hacer una comparación con base en los parámetros de aceptación y rechazo o los límites máximos y mínimos para las propiedades calculadas.

Figura 21.



Nota. Ensayo de densidad y absorción de agregados.

Figura 22.



Nota. Medición de datos para ensayo de densidad y absorción de agregados gruesos.

7.3.4.1. Agregado grueso natural

Los datos obtenidos luego del procedimiento inicial de humedecimiento y secado fueron los siguientes:

Tabla 25.

Datos para el ensayo de densidad y absorción en agregado grueso natural.

ÍTEM	AGREGADO NATURAL
A. (Masa del aire de la muestra seca al horno)	4233 g
B. (Masa al aire de la muestra saturada y SSS)	4355.5 g
C. (Masa aparente de la muestra saturada en agua)	2635.5 g

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Una vez obtenidos los datos iniciales descritos en la tabla anterior se procede a realizar la formulas propuestas por la norma para hallar las siguientes densidades y el valor de absorción:

Tabla 26.

Resultados de ensayo de densidad y absorción en agregado grueso natural.

RESULTADOS AGN	
Densidad aparente	2.45
Densidad Nominal	2.64
Densidad relativa SSS	2.53
Absorción	2.89%

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

7.3.4.2. Agregado grueso reciclado

Como se mencionó en el ítem anterior para el ensayo se densidad y absorción en el agregado grueso reciclado se procedió de igual forma, por lo que los valores iniciales y resultados obtenidos fueron los siguiente:

Tabla 27.

Datos para el ensayo de densidad y absorción en agregado grueso reciclado.

ÍTEM	AGREGADO RECICLADO
A. (Masa del aire de la muestra seca al horno)	3322 g
B. (Masa al aire de la muestra saturada y SSS)	3592 g
C. (Masa aparente de la muestra saturada en agua)	1700 g

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Tabla 28.

Resultados de ensayo de densidad y absorción en agregado grueso reciclado.

<i>RESULTADOS AGR</i>	
Densidad aparente	1.75
Densidad Nominal	2.04
Densidad relativa SSS	1.90
Absorción	8.13%

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

7.3.4.3. Agregado fino

Para el agregado fino el procedimiento es en cierta medida diferente en cuanto a los aparatos utilizados no obstante el principio es el mismo.

Los resultados iniciales obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 29.

Datos para el ensayo de densidad y absorción en agregado fino natural.

<i>ÍTEM</i>	<i>AGREGADO FINO</i>
Masa Picnómetro	168 g
B. Masa Pagua	664 g
C. Masa P + w + muestra	970 g
S. Masa muestra SSS	502 g
A. Masa muestra SH	484 g

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Los resultados obtenidos con base en los datos anteriores y siguiendo el procedimiento descrito por la norma fueron:

Tabla 30.

Resultados del ensayo de densidad y absorción de agregado fino natural.

RESULTADOS AGREGADO FINO	
Densidad Relativa	2.47
Densidad aparente	2.71
Densidad SSS	2.55
Absorción	3.72%

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

7.3.5. Resumen de las propiedades de los agregados

Los resultados obtenidos en la caracterización de los materiales por medio de los ensayos expuestos en los puntos anteriores, y con los cuales se trabajará para la elaboración de los diseños de mezcla, son los siguientes:

Tabla 31.

Resumen general de las propiedades de los agregados a utilizar en la elaboración de concretos.

PROPIEDAD	MATERIALES			
	<i>Agregado fino</i>	<i>Agregado grueso natural</i>	<i>Agregado grueso reciclado</i>	<i>Limites</i>
Densidad aparente (g/cm³)	2.71	2.45	2.04	2.3 - 2.8
Absorción (%)	3.72%	2.89	8.13	0 - 5
Masa unitaria compacta (kg/m³)	-	1528.78	1618.71	1100 - 1600
Módulo de finura	2.74	-	-	2.3 - 3.1

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

7.4. Diseño de mezcla método A.C.I Del comité 211.1

El diseño de mezcla del presente estudio se lleva a cabo para efectuar la dosificación de tres tipos de mezclas de concreto diferentes en las que se utilizan diferentes porcentajes de reemplazo de agregado grueso natural por agregado grueso reciclado. Inicialmente se diseñó una mezcla

con 100% de agregado natural y 0% de agregado grueso reciclado, lo que representa la muestra de control. Posterior a ello se diseñaron las mezclas de 50% y 100% de reemplazo de agregado reciclado.

Tabla 32.

Resumen de muestras y contenidos de AR. Elaboración propia.

Muestra	Agregado grueso natural (%)	Agregado grueso reciclado (%)	Porcentaje de reemplazo (%)
CC	100	0	0
CAR50	50	50	50
CAR100	0	100	100

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Teniendo en cuenta que las muestras de concreto serían ensayadas tanto a compresión como a flexión y por ende representan parámetros de resistencia y comportamientos diferentes se utilizó la norma ACI 330 correspondiente al diseño de mezcla de concreto para pavimentos (Hook, Cole, Cost, Diulus, & Mullarky, 2001) con el fin de determinar una correlación entre el módulo de rotura (parámetro de resistencia para las viguetas) y la resistencia a la compresión (parámetro de resistencia de los cilindros de concreto) para poder utilizar un valor de resistencia en el diseño de mezcla que relacione una resistencia optima en ambos casos.

En los proyectos pequeños una relación aproximada entre la resistencia a la compresión y la resistencia a flexión puede ser determinada con la siguiente formula Ec. (2): (Hook et al., 2001)

$$M_R = 2.3 f_c^{2/3} \quad (2)$$

La anterior forma se encuentra en unidades del sistema inglés, no obstante, su equivalente en unidades intencionales Ec. (3):

$$M_R = 0.445 f_c^{2/3} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta uno de los objetivos del trabajo de grado, el cual es evaluar por medio de los ensayos realizados la idoneidad del concreto hecho con agregado reciclado de residuos de demolición para su utilización en vías urbanas de bajo tránsito en la ciudad de barranquilla, teniendo como parámetro de medición su resistencia a flexión; se parte entonces de un módulo de rotura mínimo especificado por la normativa colombiana INVIAS Capitulo 5, por medio de la tabla 500-6 de la misma.

Figura 23.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	REQUISITO
Resistencia a la flexotracción a veintiocho (28) días, mínimo (MPa): - Tránsito NT1 - Tránsito NT2 - Tránsito NT3 (Nota 1)	E-414	<div style="border: 1px solid blue; padding: 2px; display: inline-block;">3.8</div> 4.0 4.2
Contenido de cemento en masa por m ³ de concreto, mínimo (kg) - Concreto de fraguado normal - Concreto de fraguado rápido (técnica fast-track)	-	300 350
Relación agua / material cementante, máximo - Concreto de fraguado normal - Concreto de fraguado rápido (técnica fast-track)	-	0.48 0.45
Asentamiento (mm): - Formaleta fija - Formaleta deslizante	E-404	25 a 50 13 a 38

Nota. Tabla 500 -6 de la norma INVIAS capítulo 5 – especificaciones de concreto hidráulico para pavimento rígido.

Con base en la anterior tabla y teniendo en cuenta el nivel de transito bajo para el cual se desea hacer la comprobación, se tomó el valor de 3.8 MPa como módulo de rotura para el diseño del concreto.

Se procede entonces a despejar de la Ec. (3) el termino de resistencia a la compresión f'_c resultando la siguiente formula Ec. (4):

$$f_c = \sqrt{\left(\frac{MR}{0.445}\right)^3}$$

Efectuando el cálculo se halla entonces el siguiente resultado:

$$f'_c = \sqrt{\left(\frac{3.8 \text{ MPa}}{0.445}\right)^3} \rightarrow f'_c = \sqrt{8.54^3} \rightarrow f'_c = 24.95 \text{ MPa} \rightarrow 3625 \text{ PSI}$$

La resistencia a la compresión es el valor bruto sobre el cual se debería diseñar el concreto, ahora bien, es necesario aplicarle un factor de seguridad a dicho valor según lo estipula la Norma colombiana de sismo resistencia (NSR – 10). Dicha especificación es proporcionada por la tabla C.5.2.2.2 - “Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra”.

Figura 24.

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c < 21$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.3$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10f'_c + 5.0$

Nota. Tabla c.5.2.2.2 de la NSR -10 y fórmula escogida para mayorar la resistencia a la compresión requerida por el diseño de mezcla. Fuente: (Comisión asesora permanente para el regimen de construcciones sismo resistentes, 2010)

Aplicando entonces la formula obtenida de la tabla anterior la resistencia con la cual se diseñará el concreto es la siguiente:

$$f'_{cr} = f'_c + 8.3 \rightarrow f'_{cr} = 24.95 + 8.3 = 33.25 \approx \mathbf{34 \text{ MPa}}$$

$$34 \text{ MPa} = 4931.28 \text{ PSI} \approx \mathbf{5000 \text{ PSI}}$$

Es entonces como a partir de la resistencia hallada de proceder a efectuar los pasos para el diseño de mezclas de concreto.

Paso 1. Selección del asentamiento

El asentamiento requerido para la mezcla fue seleccionado con base en el tipo de construcción requerida; si bien es cierto en el caso del presente estudio el concreto será realizado para pruebas de laboratorio, no obstante, el comportamiento, como se dijo anteriormente, será analizado como si este fuera para uso en pavimento rígido de vías urbanas de bajo tránsito, sin perder de vista las otras aplicaciones posibles para el concreto reciclado. Es así como se selecciona el asentamiento adecuado a partir de la tabla 6.3.1. Asentamientos recomendados para varios tipos de construcciones (Committee ACI 211, 2002).

Tabla 33.

Tabla para la selección del asentamiento. Fuente: (Committee ACI 211, 2002)

Tipo de construcción	Asentamiento (Pulgada)	
	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>
Zapatas y muros de cimentación reforzados	3	1
Cimentaciones simples y calzaduras	3	1
Vigas y muros armados	4	1
Columnas	4	1
Losas y Pavimentos	3	1
Concreto ciclópeo	2	1



Asentamiento
seleccionado

Nota. Adaptado de: (Committee ACI 211, 2002).

Paso 2. Selección del tamaño máximo de agregado

Tabla 34.

Tabla para selección del tamaño máximo nominal del agregado grueso. Fuente: elaboración propia.

TAMAÑO MAXIMO DEL AGREGADO								
Mm	9.51	12.7	19	25.4	38.1	50.8	64	76.1
Pulg	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"

Nota. Adaptado de: (Committee ACI 211, 2002).

El tamaño máximo de agregado grueso seleccionado es de 1", por lo que el tamaño máximo nominal del mismo es de 3/4".

Paso 3. Selección de la cantidad de agua para la mezcla.

La selección de la cantidad de agua a utilizar en la mezcla se hace con ayuda de la tabla 6.3.3 "Requisitos aproximados de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaños nominales máximos de áridos" (Committee ACI 211, 2002), a través de la cual con los valores de entrada de tamaño máximo nominal y asentamiento es posible obtener el valor en kg/m³ de agua necesarios para el concreto a diseñar.

Tabla 35.

Tabla para selección de la cantidad de agua de mezclado. Fuente: (Committee ACI 211, 2002)

Cantidad de agua para concreto según el tamaño máximo nominal del agregado								
Asentamiento	Pulg	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"
	mm	9.51	12.7	19	25.4	38.1	50.8	76.1
1 a 2		207	199	190	179	166	154	130
3 a 4		228	216	205	193	181	169	124
6 a 7		243	228	216	202	190	178	-
Mas de 7		-	-	-	-	-	-	-
% Aire atrapado		3	2.5	2	1.5	1	0.05	0.03

Nota. Adaptado de: (Committee ACI 211, 2002).



Paso 4. Selección de la relación agua cemento

Para la selección de la relación agua/cemento se tomó como referencia la tabla 6.3.4(a) de la normativa de diseño de mezcla ACI 211.1 “Relación entre el tratamiento del agua o la relación agua-cemento de materiales y resistencia a la compresión del hormigón” (Committee ACI 211, 2002).

Tabla 36.

Tabla para la selección de la relación agua/cemento. Fuente: (Committee ACI 211, 2002)

Resistencia a la compresión a los 28 días, MPa	Relación agua/cemento	
	<i>Sin contenido de aire</i>	<i>Con contenido de aire</i>
41.3	0.41	-
34.47	0.48	0.4
27.57	0.57	0.48
20.68	0.68	0.59
13.78	0.82	0.74

Nota. Adaptado de: (Committee ACI 211, 2002).

Paso 5. Calculo del contenido de cemento

El factor cemento se determina dividiendo la cantidad de agua efectiva para la mezcla y la relación agua/cemento, así:

$$\frac{A}{a/c} = \frac{190}{0.48} = 395.83 \text{ Kg/m}^3$$

Los pasos a continuación dependerán del tipo de muestra, por lo que serán especificado uno a uno la obtención de las cantidades de agregados y las correcciones por humedad de cada uno de las mismas.

Paso 6. Cantidades de agregados

A. Para la muestra 1: 100% de agregado grueso natural y 0% de agregado grueso reciclado (muestra de control).

○ Cantidad de agregado grueso natural (100%)

El cálculo el contenido de agregado grueso consiste en determinar el volumen de agregado grueso por medio de la tabla 6.3.6 (Committee ACI 211, 2002) y tabla 22 del presente trabajo; posterior a ello se efectúa el cálculo correspondiente a la siguiente formula:

Tabla 37.

Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto. Fuente: (Committee ACI 211, 2002)

Tamaño máximo nominal del agregado	Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen del concreto, para diversos módulos de finura del agregado fino.			
<i>mm</i>	2.4	2.6	2.8	3
9	0.5	0.48	0.46	0.44
12.7	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.6
25.4	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1	0.75	0.73	0.71	0.69
50.8	0.78	0.76	0.74	0.72
76.2	0.82	0.8	0.78	0.76
152.4	0.87	0.85	0.83	0.81

Nota. Adaptado de: (Committee ACI 211, 2002).

El valor es seleccionado por medio de interpolación doble debido a que el módulo de finura no corresponde exactamente a los encabezados de columnas de la tabla 22.

El factor de volumen de agregado grueso obtenido por dicha interpolación es de **0.63**, entonces:

$$\text{Cantidad de agregado grueso (kg/m}^3\text{)} = 0.63 * 1528.78 \text{ kg/m}^3 = 963.13 \text{ kg/m}^3$$

○ **Agregado fino natural**

Para poder calcular la cantidad de agregado grueso es necesario determinar los volúmenes absolutos de cada uno de los elementos que hacen parte de la mezcla de concreto para poder restar dichos volúmenes a 1m^3 de concreto.

Tabla 38.

Peso seco y volúmenes absolutos de material para el cálculo del peso de agregado fino.

MATERIAL	PESO SECO kg/m ³	PESO ESPECÍFICO g/cm ³	VOLUMEN l/m ³
Cemento	395.83	3.1	127.69
Agua	190.00	1	190.00
Agregado grueso natural	963.13	2.45	393.11

A partir de la información mostrada en la anterior tabla se calculan los volúmenes absolutos de cada elemento y se le restan a 1000 l/m^3 lo que da como resultado el volumen que ocupa el agregado fino en la mezcla.

$$1000 - (127.69 + 190.00 + 393.11) = 289.20\text{ l/m}^3$$

Entonces el peso del agregado fino será:

$$289.20 * 2.71 = 784.39\text{ kg/m}^3$$

Tabla 39.

Tabla de pesos seco y volúmenes absolutos completa para la muestra 1.

MATERIAL	PESO SECO kg/m ³	PESO ESPECÍFICO g/cm ³	VOLUMEN l/m ³
Cemento	395.83	3.1	127.69
Agua	190.00	1	190.00
Agregado grueso natural	963.13	2.45	393.11
Agregado fino	784.39	2.71	289.20
TOTAL			1000

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Paso 7. Corrección por humedad

Los pesos corregidos de agregado grueso y agregado fino respectivamente con base al contenido de humedad de cada uno quedarían de la siguiente manera:

$$\text{Peso agregado grueso natural húmedo} = 963.13 \text{ kg} (1 + 0.0015) = 964.58 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso del agregado fino natural húmedo} = 786.52 \text{ kg} (1 + 0.0256) = 804.47 \text{ kg/m}^3$$

Paso 8. Corrección por absorción

El valor requerido de agua para la mezcla debe ser corregido por exceso o por defecto con base en los parámetros de absorción de los agregados, si estos son menores que el parámetro de humedad entonces se corrige por exceso por lo que la cantidad de agua debe disminuir, y lo contrario sucede si los parámetros de absorción son mayores a los de humedad, es decir la cantidad de agua aumenta.

$$A_{agn} = - 963.13 * \frac{0.15 - 2.90}{100} = \mathbf{26.49 \text{ l/m}^3}$$

$$A_{afn} = - 784.39 * \frac{2.56 - 3.72}{100} = \mathbf{9.10 \text{ l/m}^3}$$

$$A_{corregida} = A + A_{agn} + A_{afn} = 190 + 26.49 + 9.10 = \mathbf{225.59 \text{ l/m}^3}$$

El resumen de datos correspondientes a la mezcla #1 (muestra de control, 100% de agregado natural) es el siguiente:

Tabla 40.

Resumen de diseño de mezcla de la Muestra #1 (Muestra de control, 100% de agregado grueso natural)

MATERIAL	Peso Seco kg/m ³	Peso Húmedo Kg/m ³	Relación	Peso kg/1cilindro	Peso kg/1vigüeta
<i>Cemento</i>	395.83	395.83	1.00	2.53	5.63
<i>Agua</i>	190.00	225.59	0.57	1.44	19.26
<i>Agregado Grueso</i>	963.13	964.58	2.44	6.17	13.73
<i>Agregado Fino</i>	784.39	804.47	2.03	5.14	11.45

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

B. Para la muestra 2: Muestra con 50% de agregado reciclado y 50% de agregado natural

Debido a que los pasos 6, 7 y 8 se efectúan de la misma forma para todas las muestras, se resumirá el procedimiento de tal forma que se muestre el resultado final en cada diseño.

○ **Cantidad de agregado grueso (50% natural y 50% reciclado)**

El factor de volumen de agregado grueso obtenido por interpolación en la tabla 22. es de **0.63**, entonces:

$$\text{Cantidad de agregado grueso (kg/m}^3\text{)} = 0.63 * 1573.75 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{991.46 \text{ kg/m}^3}$$

○ **Cantidad de agregado fino natural**

Posterior al cálculo de volúmenes absolutos y pesos secos de materiales se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 41.

Tabla de pesos seco y volúmenes absolutos completa para la muestra 2.

MATERIAL	PESO SECO kg/m ³	PESO ESPECÍFICO g/cm ³	VOLUMEN l/m ³
Cemento	395.83	3.1	127.69
Agua	190.00	1	190.00
Agregado grueso natural	991.46	2.45	441.63
Agregado fino	652.80	2.71	240.68
TOTAL			1000

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Peso seco del agregado fino para la muestra 2: **652.80 kg/m³**

Paso 7. Corrección por humedad

Los pesos corregidos de agregado grueso y agregado fino respectivamente fueron:

Peso agregado grueso natural/reciclado = 1008.31 kg/m³

Peso del agregado fino natural húmedo = 669.51 kg/m³

Paso 8. Corrección por absorción

La corrección de agua por absorción en esta muestra también se hizo por defecto, por lo que resulto de la siguiente manera:

$$A_{agn} = 37.82 \text{ l/m}^3$$

$$A_{afn} = 7.57 \text{ l/m}^3$$

$$A_{corregida} = A + A_{agn} + A_{afn} = 190 + 37.82 + 7.57 = 235.40 \text{ l/m}^3$$

Se obtiene entonces los siguientes resultados para el diseño de mezcla de la muestra 2.

Tabla 42.

Resumen de diseño de mezcla de la Muestra #2 (50% de agregado grueso natural y 50% de agregado grueso reciclado).

MATERIAL	Peso Seco kg/m ³	Peso Húmedo Kg/m ³	Relación	Peso kg/1cilindro	Peso kg/1vigüeta
<i>Cemento</i>	395.83	395.83	1.00	2.53	5.63
<i>Agua</i>	190.00	235.40	0.59	1.51	20.10
<i>Agregado Grueso</i>	991.46	1008.31	2.55	6.45	14.35
<i>Agregado Fino</i>	652.80	669.51	1.69	4.28	9.53

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

C. Para la muestra 3: Muestra con 100% de agregado reciclado

○ Cantidad de agregado grueso reciclado (100%)

El factor de volumen de agregado grueso obtenido por interpolación en la tabla 22. es de **0.63**, entonces:

$$\text{Cantidad de agregado grueso (kg/m}^3\text{)} = 0.63 * 1619.71 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{1019.79 \text{ kg/m}^3}$$

○ Cantidad de agregado fino natural

Posterior al cálculo de volúmenes absolutos y pesos secos de materiales se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 43.

Tabla de pesos seco y volúmenes absolutos completa para la muestra 3.

MATERIAL	PESO SECO kg/m ³	PESO ESPECÍFICO g/cm ³	VOLUMEN l/m ³
Cemento	395.83	3.1	127.69
Agua	190.00	1	190.00
Agregado grueso natural	1019.79	2.45	499.90
Agregado fino	494.77	2.71	182.41
TOTAL			1000

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Peso seco del agregado fino para la muestra 3: **494.77 kg/m³**

Paso 7. Corrección por humedad

Los pesos corregidos de agregado grueso y agregado fino respectivamente fueron:

Peso agregado grueso natural/reciclado = 1049.77 kg/m³

Peso del agregado fino natural húmedo = 507.43 kg/m³

Paso 8. Corrección por absorción

La corrección de agua por absorción en esta muestra también se hizo por defecto, por lo que resulto de la siguiente manera:

$$A_{agn} = 52.93 \text{ l/m}^3$$

$$A_{afn} = 5.74 \text{ l/m}^3$$

$$A_{corregida} = A + A_{agn} + A_{afn} = 190 + 53.93 + 5.74 = 248.67 \text{ l/m}^3$$

Se obtiene entonces los siguientes resultados para el diseño de mezcla de la muestra 3.

Tabla 44.

Resumen de diseño de mezcla de la Muestra #3 (100% de agregado grueso reciclado).

MATERIAL	Peso Seco kg/m ³	Peso Húmedo Kg/m ³	Relación	Peso kg/1cilindro	Peso kg/1vigüeta
<i>Cemento</i>	395.83	395.83	1.00	2.53	5.63
<i>Agua</i>	190.00	248.67	0.63	1.59	21.23
<i>Agregado Grueso</i>	1019.79	1049.77	2.65	6.71	14.95
<i>Agregado Fino</i>	494.77	507.70	1.28	3.24	7.22

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

7.5. Elaboración de mezclas y preparación de especímenes de concreto

Luego de conocer los parámetros de dosificación de las diferentes mezclas de concreto a realizar, se procede a iniciar a la preparación del concreto y la fabricación de los especímenes de ensayo para los dos tipos de pruebas mecánicas que se plantea analizar. Tanto las mezclas como los especímenes fueron desarrollados los días 10, 20 y 21 de Julio del 2017 en las instalaciones de la empresa MATCH OVERSEAS S.A.S. quien fue ente patrocinador principal del presente trabajo de grado y quien presto los equipos necesarios para la fabricación de las mezclas de concreto, así como parte del material prima y el espacio para curado de los especímenes que posteriormente serían trasladados a la Universidad de la Costa para sus respectivos ensayos. La característica de los concretos o mezclas a realizar y los tipos de ensayos a los que se someterán los especímenes son descritos en la siguiente tabla.

Tabla 45.

Especificaciones generales de los concretos elaborados y especímenes de ensayo.

CONCRETO	DESCRIPCIÓN	ESPECÍMENES						ESPECIMENES X DÍA DE CURADO		
		# Cilindros	Ensayo	Norma	# Viguetas	Ensayo	Norma	7	14	28
CONCRETO 1	Concreto de control (100% de agregado natural, sin agregado reciclado).	6			6			4	4	4
CONCRETO 2	Concreto con 50% de agregado reciclado y 50% de agregado grueso natural.	6	Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.	NTC 673 ASTM C39	6	Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre.	INV E-414-13 ASTM C78	4	4	4
CONCRETO 3	Concreto reciclado con 100% de agregado reciclado y 0% de agregado natural.	6			6			4	4	4

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

7.5.1. Equipos y herramientas

Los tres tipos de concretos fueron elaborados como se mencionó en el ítem anterior con las herramientas y equipos necesarios y fueron proporcionados por la empresa MATCH OVERSEAS S.A.S. la totalidad de ellos, a excepción de los moldes para especímenes de viguetas los cuales fueron alquilados.

Entre los principales equipos y herramientas utilizadas y sus especificaciones para la elaboración de los concretos y especímenes están:

- **Maquina mezcladora:** Con capacidad de 75 kg, marca Bauker.

- **Moldes cilíndricos:** En material plástico ABS, con dimensiones de 15cm de diámetro por 30 cm de alto.
- **Moldes de viguetas:** De material de acero, con dimensiones de 53cm de largo por 15cm de alto y 15cm de ancho.
- **Recipientes de plástico y palas:** Para vaciado del concreto.
- **Maso de goma:** Para compactación del concreto en los moldes según los especificado por la norma.
- **Varilla de acero:** Con las especificaciones de la NTC 1377 (ASTM C192).

Figura 25.



Nota. Moldes cilíndricos para elaboración de especímenes de ensayo.

Figura 26.



Nota. Moldes de viguetas para especímenes de ensayo a flexión.

7.6. Análisis de resultados

Una vez llevado a cabo el respectivo proceso de curado por inmersión en agua de las diferentes probetas fabricadas (cilindros y viguetas estándar) se procede a ejecutar los ensayos mecánicos de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión (ASTM International, 2016, 2017).

El análisis de los resultados obtenidos en los ensayos mencionados tiene como finalidad evaluar el comportamiento de las muestras de concreto respecto a un concreto de comportamiento normal o de control, además de ellos pretende plantear hipótesis y arrojar conclusiones respecto a tres temas en específico:

- Correlación existente entre la resistencia a la compresión del concreto y dos variables, el porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado y la edad o días de curado del concreto.
- Correlación existente en entre los dos parámetros de resistencia ensayados, es decir resistencia a la compresión del concreto (f'_c) y resistencia a la flexión o módulo de rotura de este.

- Correlación existente entre la resistencia a la flexión del concreto y dos variables, el porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado y la edad o días de curado del concreto.

Las tres premisas anteriores, las cuales se intentan resolver implican para su determinación un análisis tanto grafico como estadísticos desde el punto de vista de tecnología del concreto y desde el punto de vista matemático. Para facilitar la discusión respecto a los temas planteados se mostrará por separado la información calculada experimental y matemáticamente para el ensayo de compresión y para el ensayo de flexión.

7.6.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se determinó a las edades de 7, 14 y 28 días, teniendo tres tipos de muestras o de concretos (CC= Concreto de control; CAR50= Concreto reciclado con 50% de reemplazo y CAR100= Concreto reciclado con 100% de reemplazo) para los cuales se fabricaron dos muestras por cada edad de ensayo y tipo de muestra.

Como es sabido, la resistencia del concreto normal, se desarrolla de forma estándar desde la edad de 0 días hasta 28 días, esta última representa la edad en la que el concreto debería alcanzar mínimo el 100% de su resistencia de diseño para poder ser aceptado. Edades posteriores a los 18 días son tenidas en cuenta cuando se quiere desarrollar un estudio más exhaustivo y por lo general cuando se desea también analizar propiedades de durabilidad y/o desarrollo de su resistencia en el tiempo de vida útil que tendrá el concreto fabricado.

En el presente trabajo de grado se tomaron como referencia de medición tres (3) edades de curado; 7 días (resistencias tempranas), 14 días (edad intermedia) y 28 días (resistencia normal

del concreto; a través de las cuales se propondrán e intentarán comprobar las diferentes hipótesis del proyecto.

Para efectos del análisis e interpretación de la información se establecieron las variables X_1 como porcentaje de reemplazo de agregado grueso natura por agregado grueso reciclado, y X_2 como edades de curado del concreto (días), los cuales representan las dos variables independientes. Los términos dependientes en este caso de estudio serán en cada caso la resistencia a la compresión (f'_c) y la resistencia a flexión (MR).

Para cada tipo de muestra de concreto en cada edad se cuenta con dos probetas, por lo que se tendrán dos valores de f'_c alcanzados en cada caso. Los resultados totales obtenidos en los casos mencionados son los siguientes:

Tabla 46.

Resultados totales de ensayo de resistencia a la compresión. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Porcentaje de reemplazo (%)	f'_c (MPa)	Curado (días)
CC	0	19.37	7
CC	0	19.67	7
CC	0	23.02	14
CC	0	25.92	14
CC	0	30.84	28
CC	0	32.09	28
CAR50	50	18.69	7
CAR50	50	19.01	7
CAR50	50	21.97	14
CAR50	50	21.13	14
CAR50	50	27.95	28
CAR50	50	28.51	28
CAR100	100	17.34	7
CAR100	100	17.54	7

CAR100	100	19.06	14
CAR100	100	18.44	14
CAR100	100	22.35	28
CAR100	100	22.72	28

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

En miras a realizar un análisis más consiente y preciso es necesario tener en cuenta todos los valores o resultados obtenidos en cada edad y tipo de muestra, no obstante, y para facilitar un poco la comprensión del comportamiento del concreto reciclado se generó una tabla resumen con los promedios de las resistencias en cada edad y tipo de muestra, la cual se muestra a continuación.

Tabla 47.

Resultado promedio del ensayo de resistencia a compresión. Fuente: Elaboración propia.

Resultados para concreto de $f'_c = 34$ MPa a los 7, 14 y 28 días.				
<i>Muestra</i>	<i>Porcentaje de Reemplazo (%)</i>	<i>Resistencia compresión (MPa)</i>	<i>Porcentaje de resistencia alcanzado (%)</i>	<i>Edad curado (Días)</i>
CC	0%	19.52	57%	7
	0%	24.47	72%	14
	0%	31.47	93%	28
CAR50	50%	18.85	55%	7
	50%	21.55	63%	14
	50%	28.23	83%	28
CAR100	100%	17.44	51%	7
	100%	18.75	55%	14
	100%	22.54	66%	28

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Con base en los valores de f'_c obtenidos y el porcentaje de resistencia a la compresión (f'_c) alcanzado respecto a la resistencia de diseño (34 MPa) se puede observar que no se logró cumplir con dicha resistencia, debido a que las resistencias alcanzadas para las muestras CC,

CAR50, y CAR100, fueron de 31.47 MPa, 28.23 MPa, y 22.54MPa respectivamente por lo que si hablamos de concreto reciclado el más resistente fue CAR50 sus 28 días.

Esta información permite plantear una discusión respecto a la viabilidad del concreto hecho con agregado reciclado para su utilización como concreto con exigencias de resistencia altas. Sin embargo las investigaciones del entorno académico al respecto y los resultados del presente trabajo permiten ver un 83% de resistencia para CAR50 y un 66% para CAR100, como algo prometedor, debido a que numerosas alternativas para mejorar las propiedades tanto del AR, como del CR, como por ejemplo pre-humedecimiento del agregado, caracterización de los residuos de concreto, control de relación A/C, e incluso el uso de aditivos que mejore las propiedades del concreto fresco, como es el caso de los reductores de agua y plastificantes, lo cual depende también del uso que se le vaya a dar a dicho concreto.

Es importante resaltar propiedades importantes determinados durante el proceso de elaboración de las probetas (concreto en estado fresco) y al momento de hacer las fallas (concreto en estado endurecido).

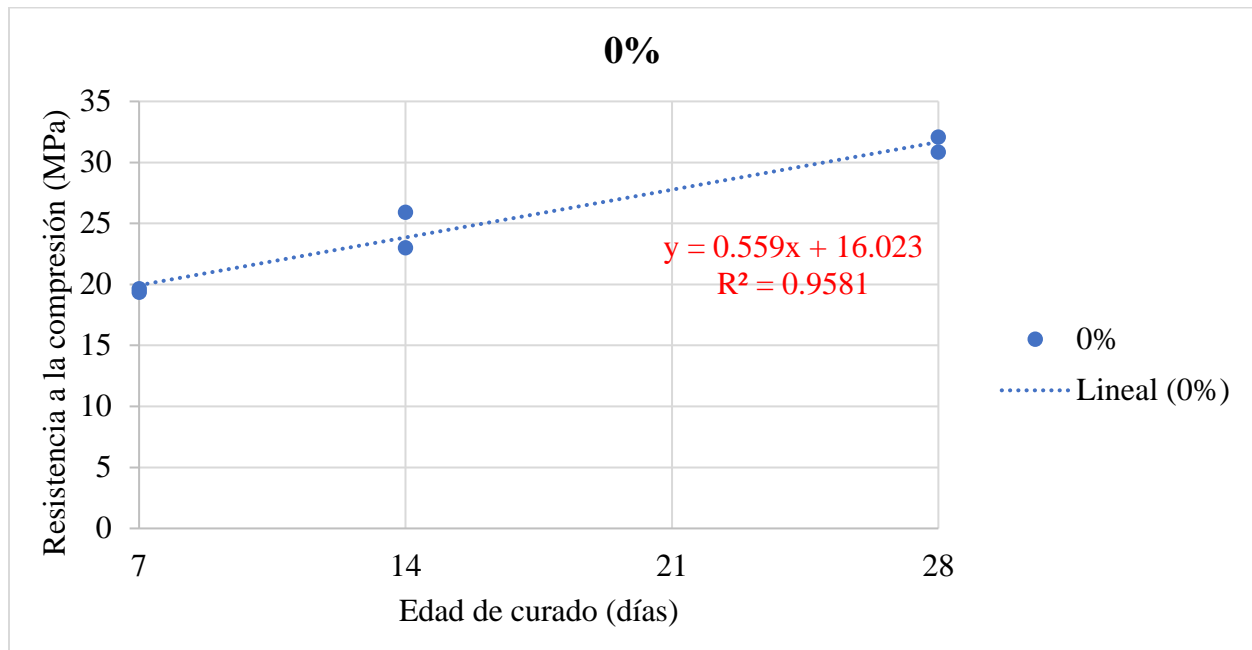
Tabla 48.

Propiedades de Densidad y Asentamiento del concreto. Fuente: Elaboración propia.

	CC	CAR50	CAR100
Asentamiento (mm)	55	62	57
Densidad (kg/m³)	2413.9	2388.64	2287.23

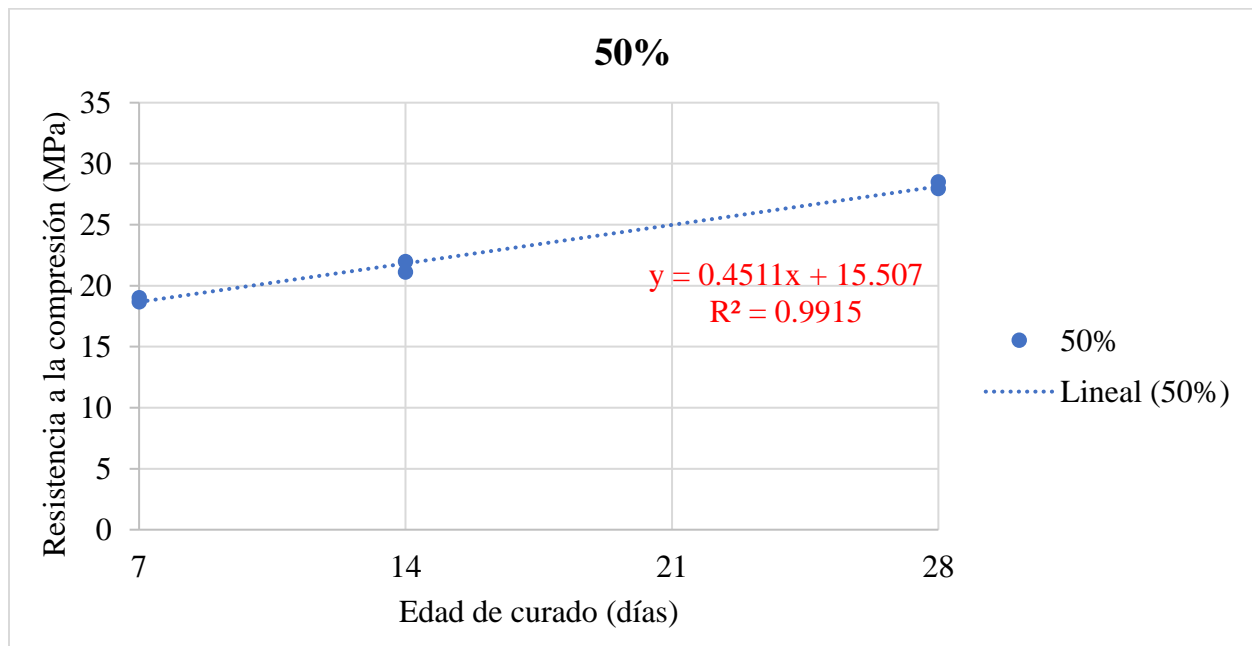
Una vez se cuenta con las resistencias totales y promedios alcanzadas durante las diferentes edades en cada muestra, se realizan graficas que permitan entender la evolución de la resistencia del concreto, y el comportamiento de cada uno de ellos de acuerdo con el porcentaje de reemplazo, dicho análisis grafico se hizo en primera instancia de manera individual de acuerdo con cada variable (X_1 y X_2). Para la variable X_1 las gráficas obtenidas fueron las siguientes.

Figura 27.



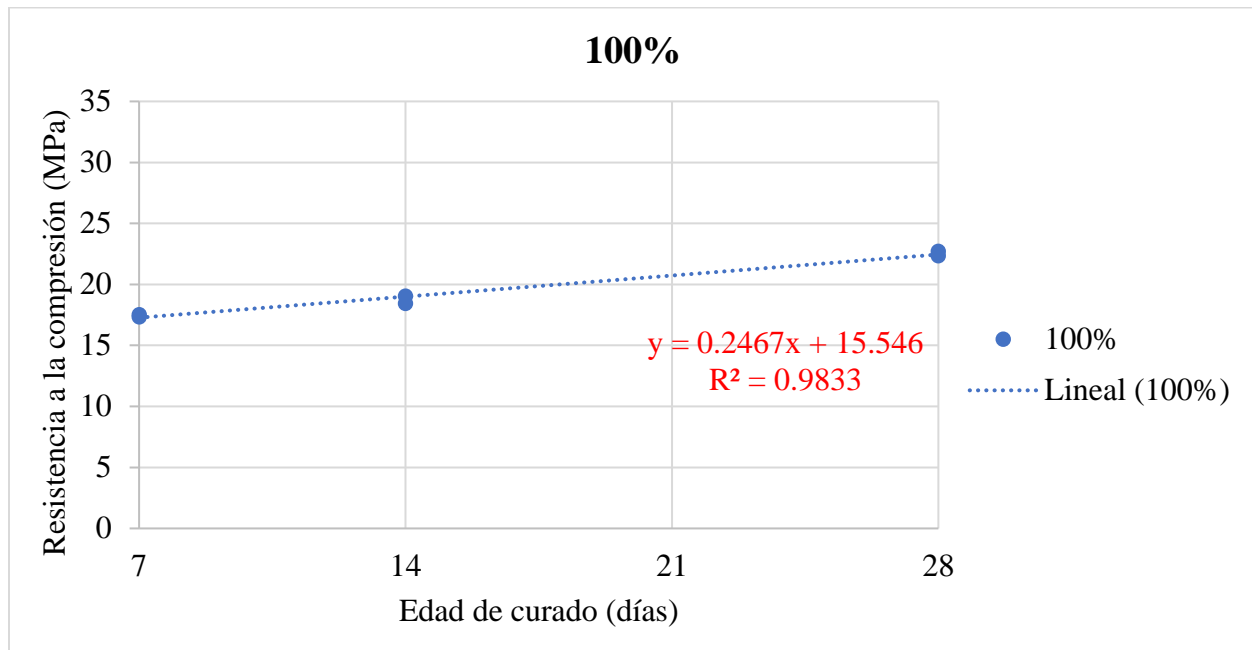
Nota. f'_c (MPa) Vs Edad de curado (días) para un porcentaje de reemplazo de 0%.

Figura 28.



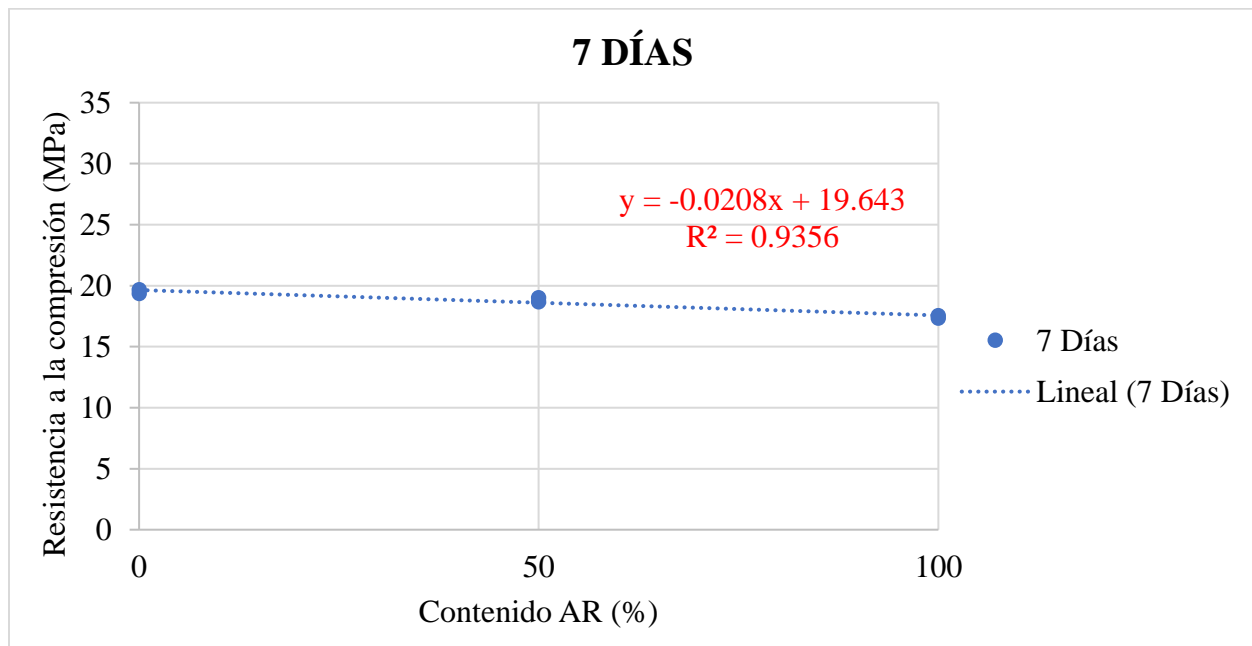
Nota. f'_c (MPa) Vs Edad de curado (días) para un porcentaje de reemplazo de 50%.

Figura 29.



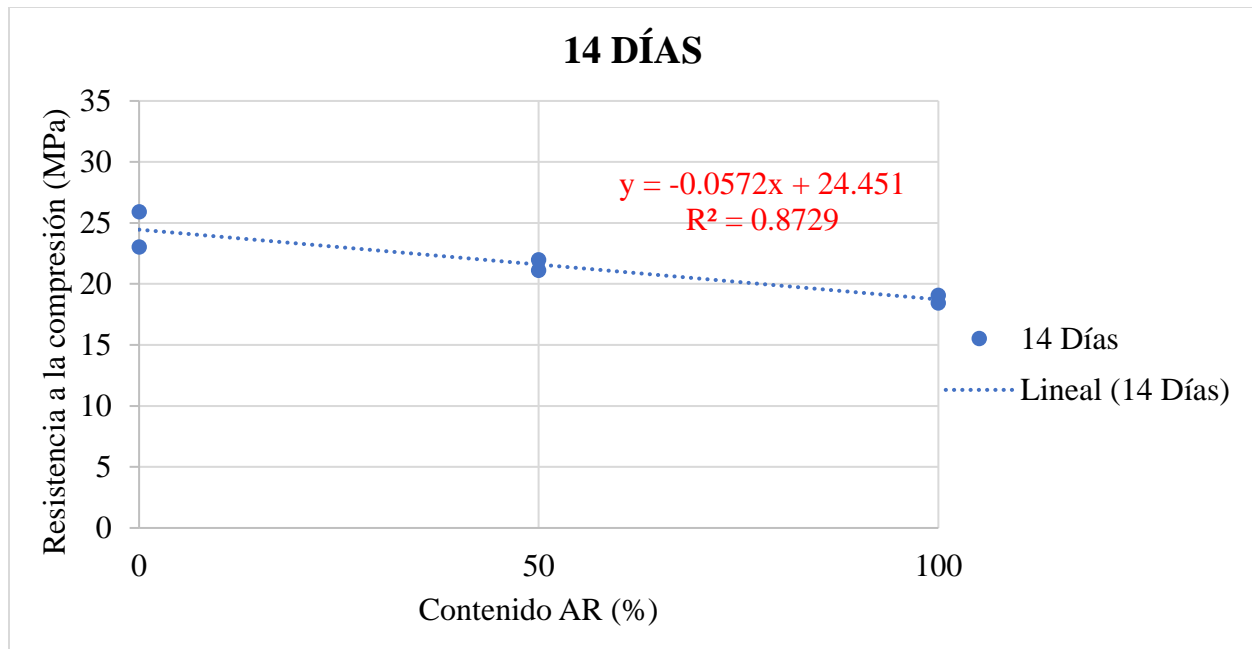
Nota. $f'c$ (MPa) Vs Edad de curado (días) para un porcentaje de reemplazo de 100%.

Figura 30.



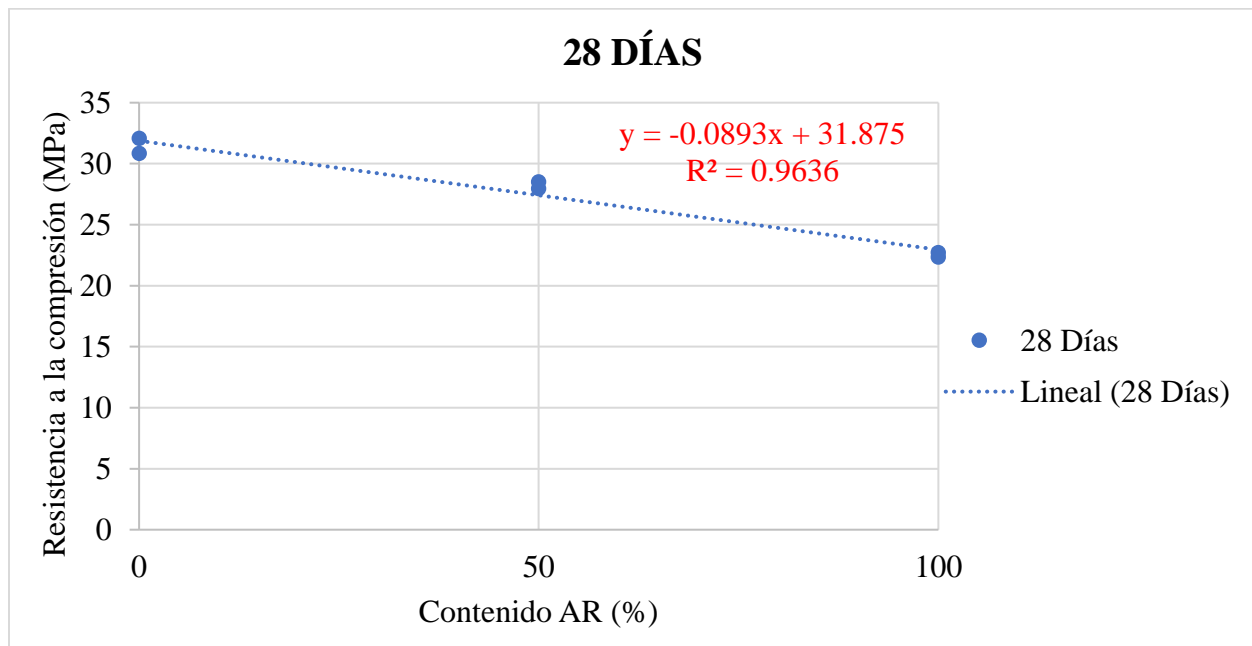
Nota. $f'c$ (MPa) Vs Contenido de AR o porcentaje de reemplazo (%) a la edad de 7 días.

Figura 31.



Nota. f'_c (MPa) Vs Contenido de AR o porcentaje de reemplazo (%) a la edad de 14 días.

Figura 32.



Nota. f'_c (MPa) Vs Contenido de AR o porcentaje de reemplazo (%) a la edad de 28 días.

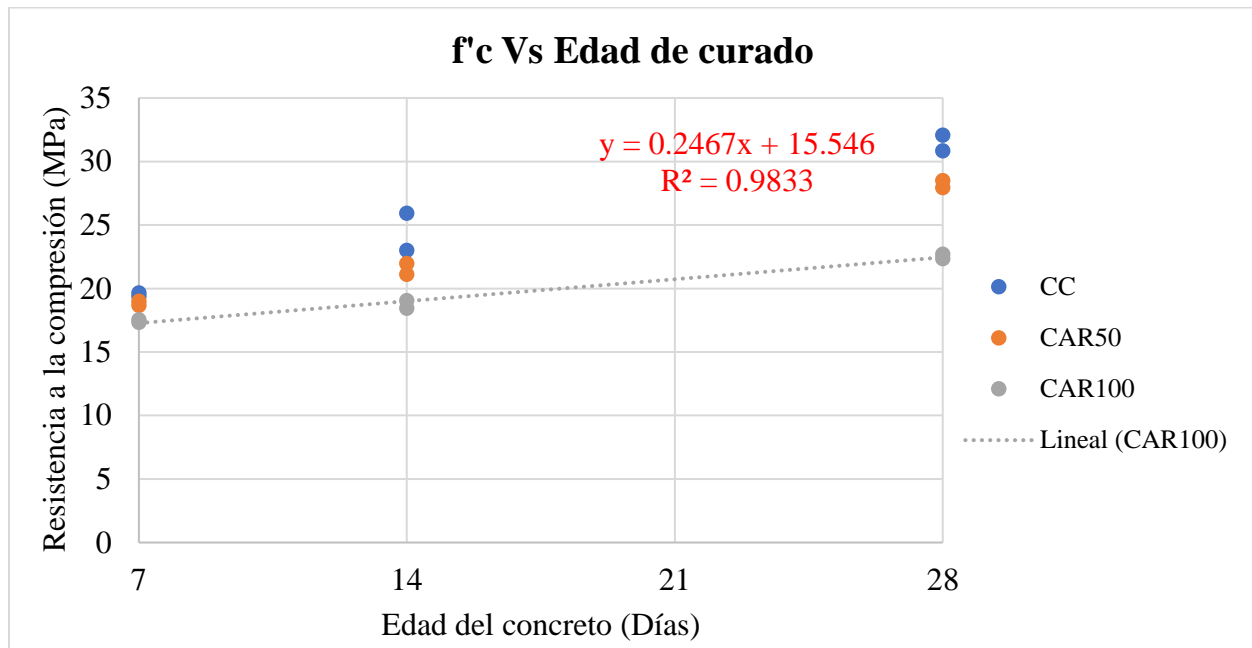
Como es posible observar para ambos casos de análisis individual de cada variable se determinó con ayuda del programa Excel la ecuación del gráfico que relaciona dichas variables y a su vez se halló el coeficiente de determinación o R^2 el cual nos indica la representatividad del modelo que mejor describe el comportamiento de la gráfica, que en el caso del presente trabajo el que mejor se ajusta es el lineal, este valor además nos permite establecer una confiabilidad de las correlaciones encontradas entre las distintas variables.

Tanto la ecuación como el valor del R^2 se representan en letra toja dentro del área del gráfico y la línea de tendencia de la gráfica se representa por medio de una línea puntada del mismo color de los puntos.

Un análisis inicial de las gráficas anteriormente mostradas nos permite afirmar respecto a la variable X_1 (Porcentaje de reemplazo %) que el desarrollo de la resistencia de cada tipo de concreto a través de los días de curado se desarrolla de forma normal, es decir, $f'c$ tiende a aumentar según pasan los días. Respecto a la variable X_2 (Edad de curado en días) también se observa un comportamiento esperado por lo que ya se conoce respecto al concreto hecho con agregado reciclado, es decir, el valor de $f'c$ disminuye o decrece en la medida que el porcentaje de reemplazo aumenta; esto confirma la idea de la gran mayoría de los autores que han investigado respecto al concreto reciclado, la resistencia del concreto se inversamente proporcional al porcentaje de reemplazo de árido reciclado por árido natural. Cabe la aclaración de que el contenido de AR no es el único factor que influye en la disminución de $f'c$ del concreto, no obstante, es el que mayor influye.

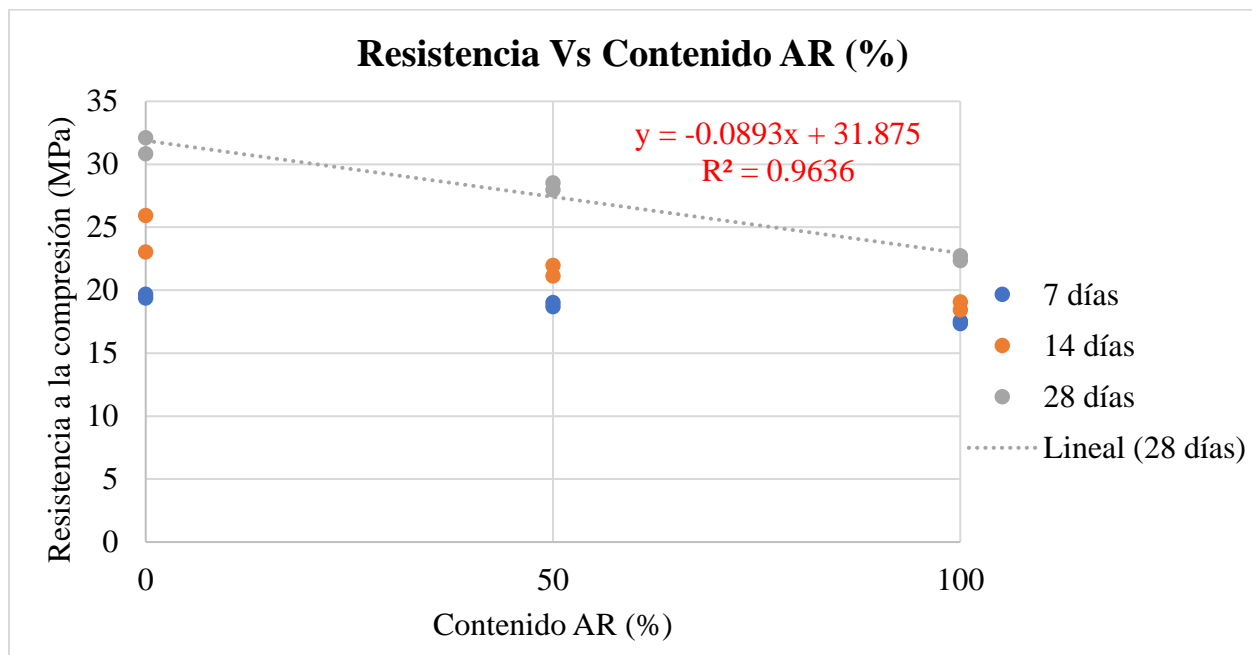
Ahora bien, es importante realizar un análisis general de la resistencia del Concreto Reciclado respecto a cada variable, cabe aclarar que dicho análisis también se realizará con cada valor de $f'c$ obtenido y no con el promedio, esto en miras a obtener valores más reales de R^2 .

Figura 33.



Nota. $f'c$ Vs Edad de curado para los tres tipos de concretos fabricados.

Figura 34.



Nota. $f'c$ Vs Contenido de AR (%) para las tres edades de curado.

Lo observado en las dos graficas anteriores atiende a lo analizado en las gráficas individuales, es decir, el comportamiento de $f'c$ respecto a las dos variables es el normal y esperado.

Las ecuaciones y los coeficientes de determinación en las dos gráficas anteriores fueron halladas para la muestra CAR100 y para la edad de 28 días respectivamente, esto debido a que la muestra CAR100 es la más importante al momento de comprender el comportamiento del concreto reciclado y porque la edad de curado de 28 días es la más representativa y estandarizada a nivel mundial para la resistencia a la compresión del concreto.

Los valores de R^2 se mantuvieron en un buen número (cercano a 1) por lo que con ello se corrobora la buena correlación que existe entre las variables estudiadas.

Es así como entonces se determina la primera ecuación principal que relaciona la resistencia a la compresión con el contenido de AR.

$$y = -0.0893x + 31.875 \quad (4)$$

7.6.1.1. Análisis de variables

El análisis de los resultados obtenidos en los ensayos respecto a las variables de las cuales depende $f'c$ pretende encontrar una correlación entre ellos y a su vez establecer un modelo matemático que permita su posterior aporte al conocimiento y comparación con otros autores e investigaciones de referencia.

La correlación entre las variables ya mencionadas se determinará por medio de regresión lineal múltiple que no es más que un método estadístico que permite ajustar modelos lineales

entre la variable dependiente $f'c$ y las dos variables independientes, porcentaje de reemplazo (X_1) y edad de curado (X_2).

Para facilitar la ejecución del modelo se resumieron los datos obtenidos en la siguiente tabla.

Tabla 49.

Resumen de datos para la regresión lineal múltiple.

ANÁLISIS POR REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE			
	X_1	X_2	Y_A
<i>Muestra</i>	<i>Porcentaje de reemplazo (%)</i>	<i>Edad de curado (días)</i>	<i>$f'c$</i>
CC	0	7	19.37
CC	0	7	19.67
CC	0	14	23.02
CC	0	14	25.92
CC	0	28	30.84
CC	0	28	32.09
CAR50	50	7	18.69
CAR50	50	7	19.01
CAR50	50	14	21.97
CAR50	50	14	21.13
CAR50	50	28	27.95
CAR50	50	28	28.51
CAR100	100	7	17.34
CAR100	100	7	17.54
CAR100	100	14	19.06
CAR100	100	14	18.44
CAR100	100	28	22.35
CAR100	100	28	22.72

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

A cada variable se le asignó una nomenclatura como se observa en la tabla y como se ha venido aclarando repetidas veces en el presente trabajo. Como también se ha dicho anteriormente

se trabajará con todos los valores y no con el promedio, por lo que se tiene un total de 18 datos, es decir, seis valores de f'_c para cada tipo de muestra.

Excel como herramienta principal de ayuda permitieron la ejecución automática del modelo de regresión lineal múltiple, obteniendo la siguiente tabla de resultados.

Tabla 50.

Tabla resumen de la regresión lineal múltiple ejecutada con Excel.

TABLA RESUMEN - REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE								
Estadísticas de la regresión								
Coeficiente de correlación múltiple		0.955850676						
Coeficiente de determinación R^2		0.913650514						
R^2 ajustado		0.90213725						
Error típico		1.450825818						
Observaciones		18						
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	2	334.07	167.04	79.36	1.05184E-08			
Residuos	15	31.57	2.10					
Total	17	365.65						
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	18.48	0.84	22.06	7.57376E-13	16.70	20.27	16.70	20.27
Variable X 1	-0.06	0.01	-6.66	7.63465E-06	-0.07	-0.04	-0.07	-0.04
Variable X 2	0.42	0.04	10.69	2.04991E-08	0.34	0.50	0.34	0.50

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Tomando netamente la información de interés para la investigación se tiene lo siguiente:

Tabla 51.

Coefficientes obtenidos en la regresión lineal múltiple.

Regresión lineal múltiple Para F'c (X1 - X2)	
	<i>Coefficientes</i>
Intercepción	18.48078315
Variable X 1	-0.055770284

Variable X 2	0.418907943
---------------------	-------------

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

La tabla anterior permite establecer la siguiente ecuación:

$$Y_A = 18.480 - 0.055 * X_1 + 0.418 * X_2 \quad (5)$$

Esta ecuación permitirá entonces calcular un valor aproximado de $f'c$ a partir del porcentaje de reemplazo y de la edad de curado. Para tener una visión más clara de la aceptabilidad de la ecuación se determinaron valores de $f'c$ calculado para poder graficarlo con los valores de $f'c$ experimental y así por medio de un análisis gráfico de dispersión poder concluir al respecto.

Tabla 52.

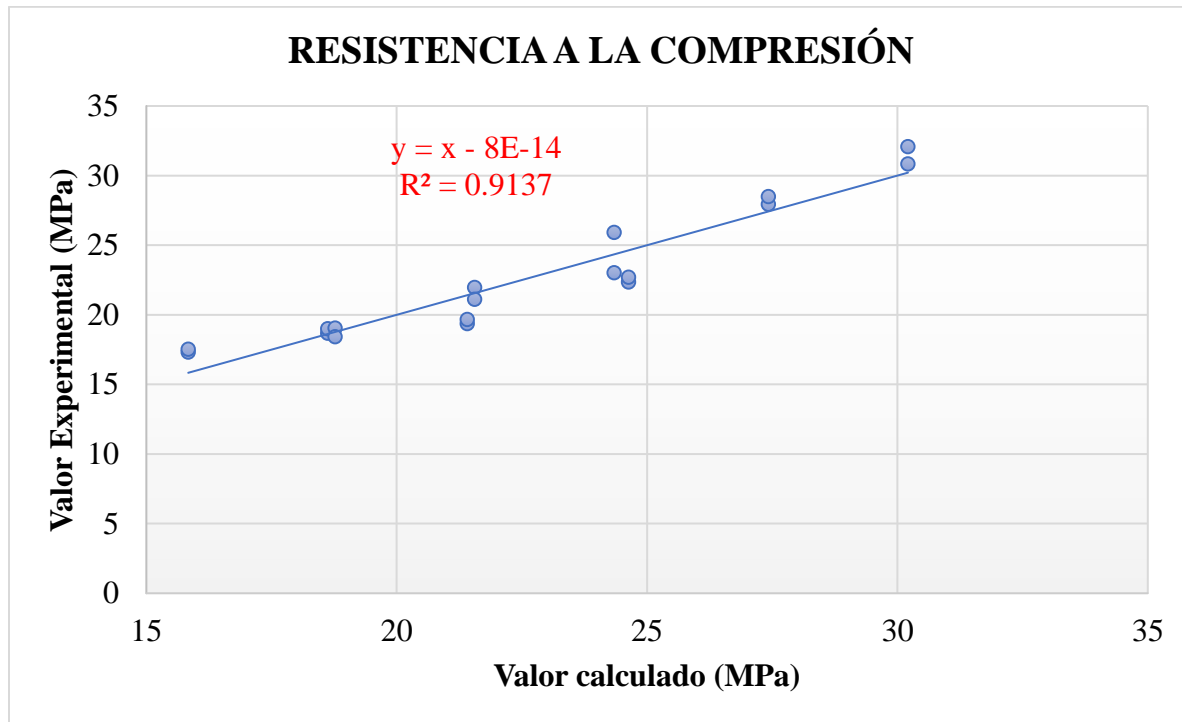
Tabla de $f'c$ experimental y $f'c$ calculado por regresión lineal múltiple.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ($f'c$)	
<i>$f'c$ experimental</i>	<i>$f'c$ calculado</i>
19.37	21.41
19.67	21.41
23.02	24.35
25.92	24.35
30.84	30.21
32.09	30.21
18.69	18.62
19.01	18.62
21.97	21.56
21.13	21.56
27.95	27.42
28.51	27.42
17.34	15.84
17.54	15.84
19.06	18.77

18.44	18.77
22.35	24.63
22.72	24.63

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Figura 35.



Nota. Grafica de dispersión para f'_c experimental Vs f'_c calculado.

De acuerdo con el análisis gráfico de dispersión de datos se observa una buena dispersión de estos como lo demuestra así su línea de tendencia. El valor de R^2 es bajo en comparación con las gráficas anteriores, no obstante, se considera aceptable debido a que se mantiene por encima de 0.90. Esto quiere decir que existe una buena correlación entre la variable dependiente y las dos variables independientes analizadas, además muy probablemente con una base de datos de ensayos más amplia, sin duda la correlación será mayor y se obtendrá un R^2 más cercano a 1.

7.6.2. Resistencia a la flexión o módulo de rotura

Para el análisis de la información de resistencia a la flexión se realiza el mismo procedimiento que con la resistencia a compresión, ya que el número de datos obtenidos es el mismo, por cada día y tipo de concreto, por ende, se genera el mismo número de gráficas y tablas.

Los valores de MR obtenidos en los diferentes tipos de muestras fueron:

Tabla 53.

Resultados de ensayo a flexión. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Porcentaje de reemplazo (%)	MR (MPa)	Edad de curado (Días)
CC	0	3.93	7
CC	0	4.17	7
CC	0	4.71	14
CC	0	4.91	14
CC	0	6.73	28
CC	0	5.13	28
CAR50	50	3.92	7
CAR50	50	3.79	7
CAR50	50	3.81	14
CAR50	50	4.13	14
CAR50	50	4.26	28
CAR50	50	4.91	28
CAR100	100	4.60	7
CAR100	100	4.46	7
CAR100	100	4.82	14
CAR100	100	4.69	14
CAR100	100	4.37	28
CAR100	100	4.46	28

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

Los valores promedios obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 54.

Resultado promedio de ensayo a flexión. Fuente: Elaboración propia.

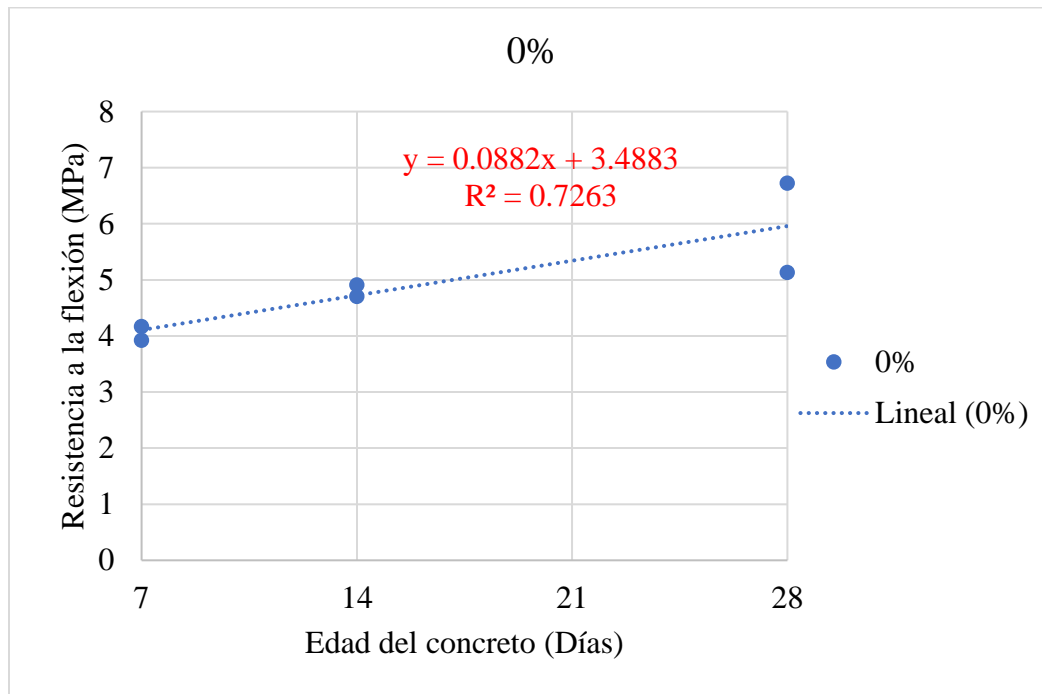
Resultados para concreto de MR=3.8 a los 7, 14 y 28 días.				
<i>Muestra</i>	<i>Porcentaje Reemplazo</i>	<i>Resistencia flexión (MPa)</i>	<i>Porcentaje Alcanzado</i>	<i>Días</i>
CC	0%	4.05	107%	7
	0%	4.81	127%	14
	0%	5.93	156%	28
CAR50	50%	3.86	102%	7
	50%	3.97	104%	14
	50%	4.59	121%	28
CAR100	100%	4.53	119%	7
	100%	4.75	125%	14
	100%	4.42	116%	28

Nota. Adaptado de: Fuente propia.

La tabla anterior nos permite observar dos caras, o dos puntos de vista, el primero de ellos es positivo debido a que se superó totalmente la resistencia de diseño, obteniendo porcentajes para las muestras CC, CAR50 y CAR100, de 156%, 121%, y 116% respectivamente, por viéndolo solo desde ese punto de vista el concreto reciclado realizado para el presente proyecto promete ser muy viable para su utilización en pavimentos urbanos de bajo tránsito.

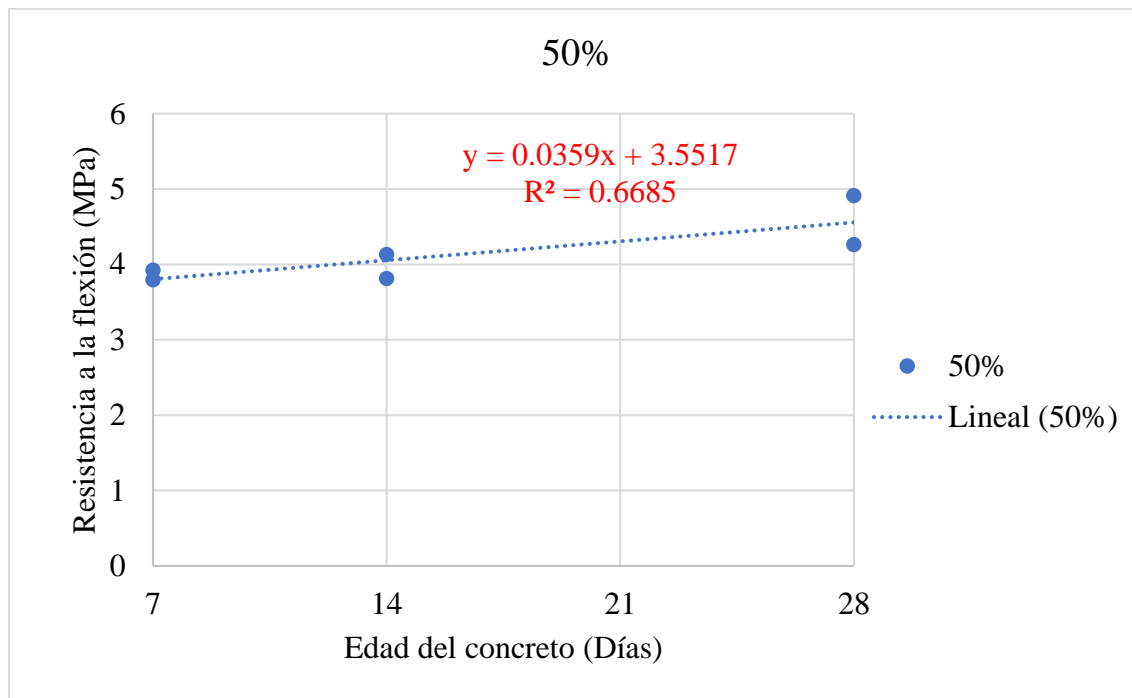
Pese a lo anterior hay un punto de vista negativo, y es que los valores de f'_c se comporta de manera atípica, irregular y sin ninguna tendencia marcada, lo cual se puede ver con el siguiente análisis individual.

Figura 36.



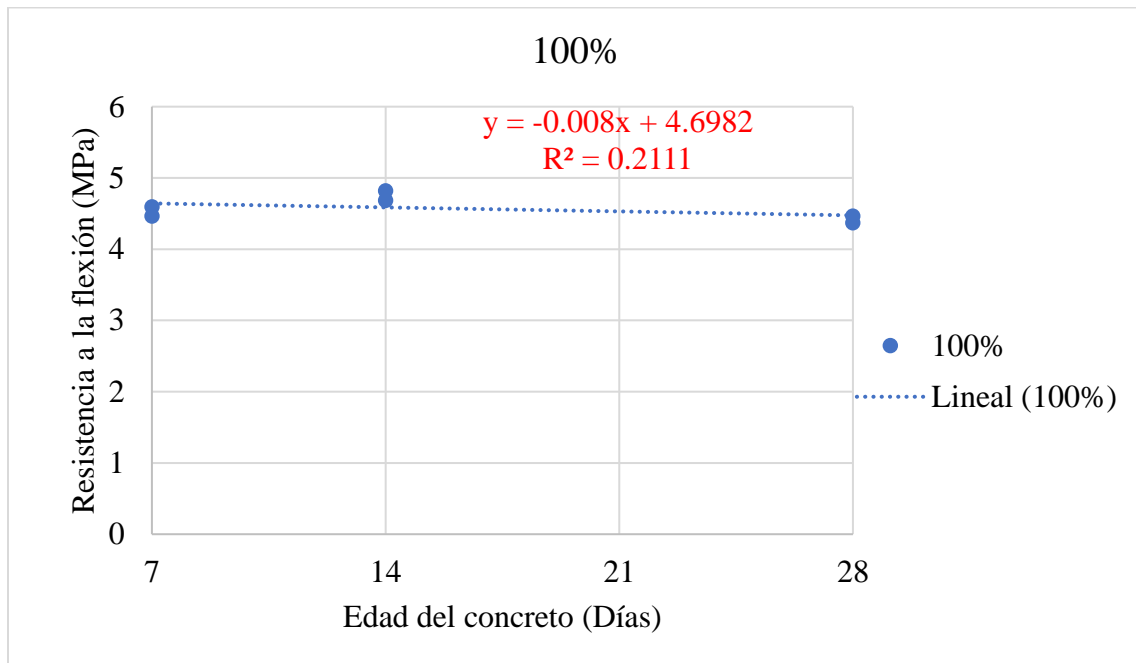
Nota. MR (MPa) Vs Edad de curado (días) para un porcentaje de reemplazo de 0%

Figura 37.



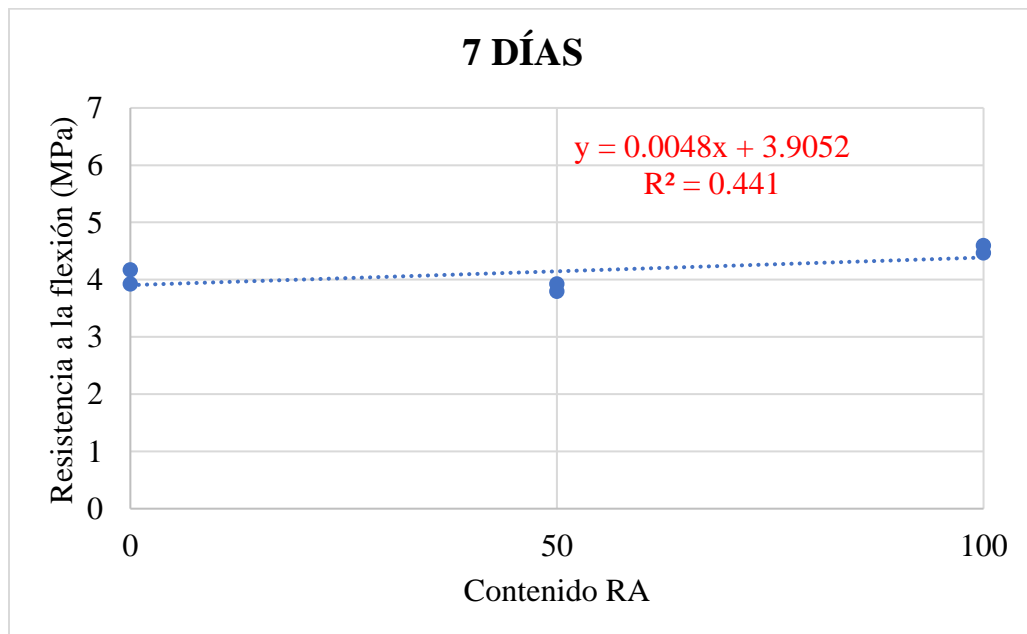
Nota. MR (MPa) Vs Edad de curado (días) para un porcentaje de reemplazo de 50%

Figura 38.



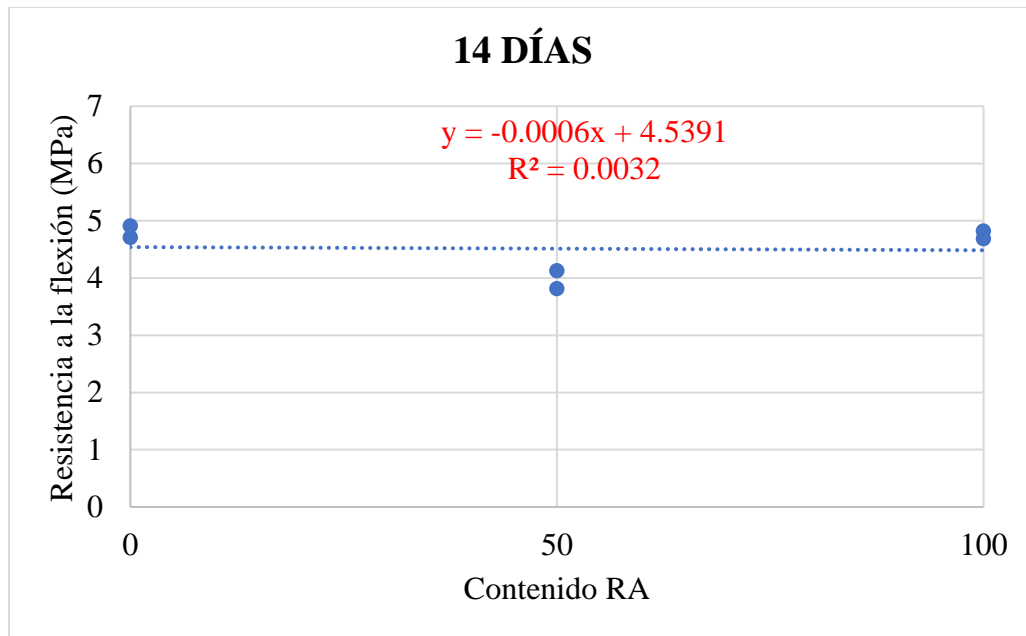
Nota. MR (MPa) Vs Edad de curado (días) para un porcentaje de reemplazo de 100%

Figura 39.



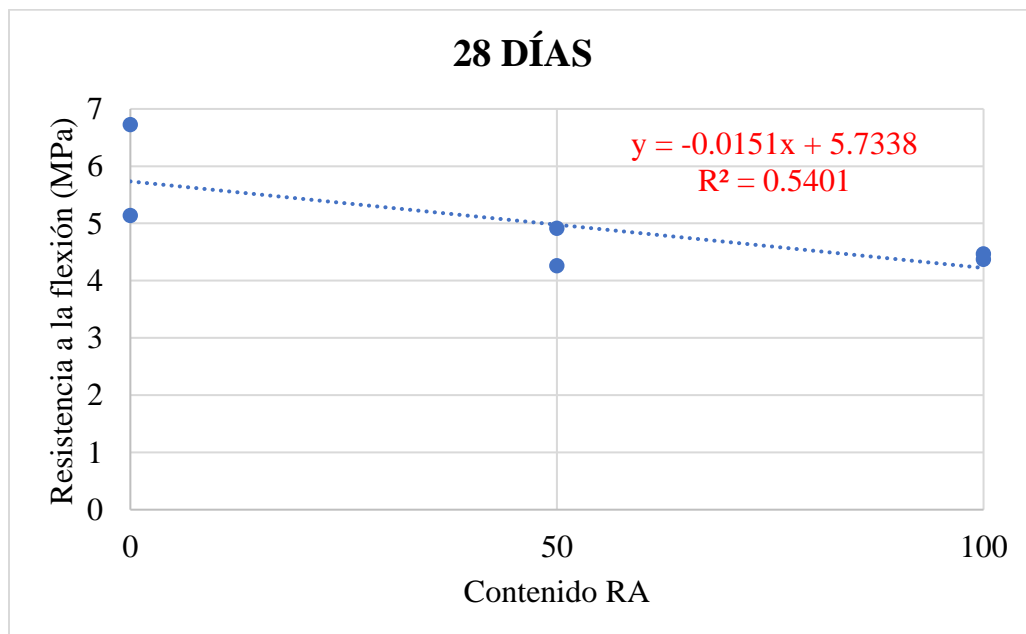
Nota. MR (MPa) Vs Contenido de AR (%) para una edad de curado de 7 días.

Figura 40.



Nota. MR (MPa) Vs Contenido de AR (%) para una edad de curado de 14 días.

Figura 41.

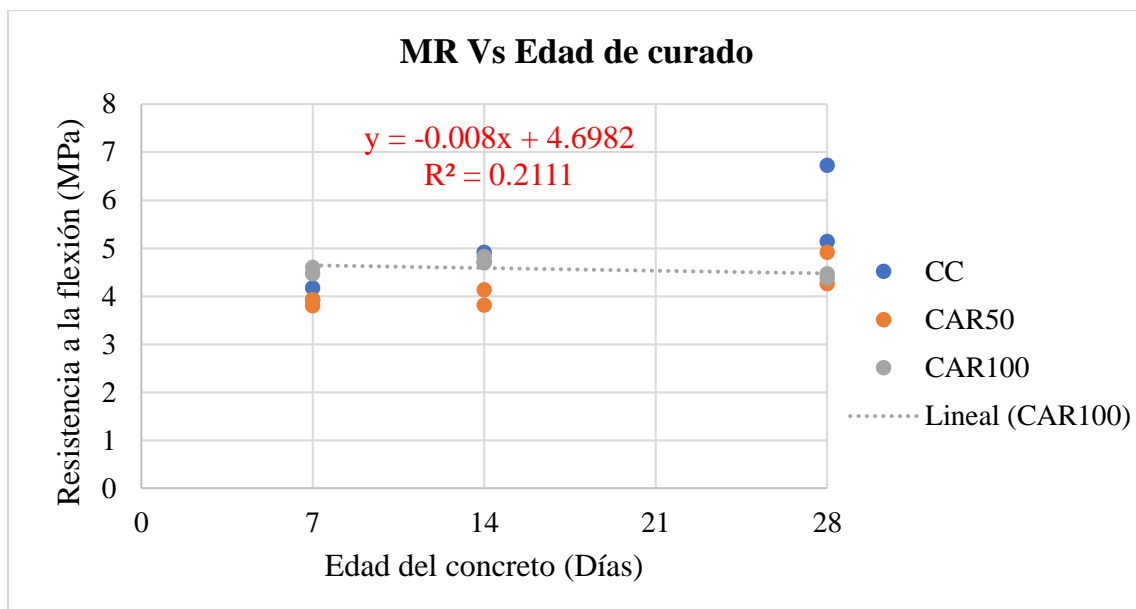


Nota. MR (MPa) Vs Contenido de AR (%) para una edad de curado de 28 días.

El análisis individual respecto a cada variable presenta un panorama un poco negativo, debido a que se comprobó lo visto en las tablas, y el comportamiento irregular y poco predecible de la resistencia a la flexión (MR), por lo que hace muy complicado establecer una correlación veraz del MR respecto a las dos variables independientes.

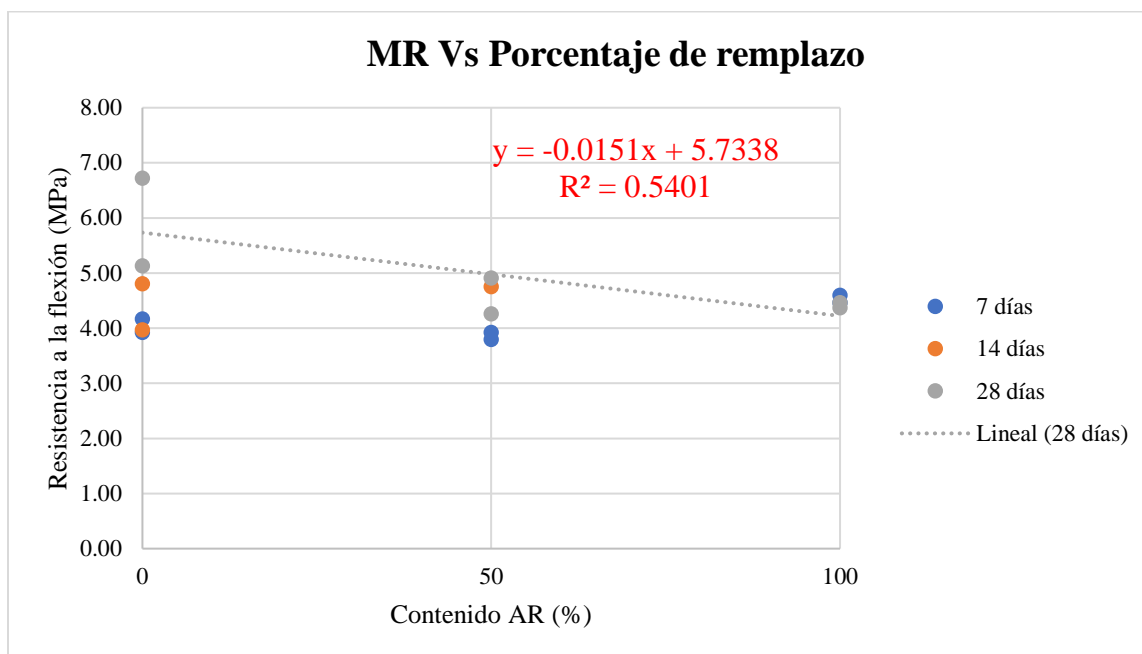
Con el análisis gráfico general se pueden comprobar dicha información.

Figura 42.



Nota. MR Vs Edad de curado para los tres tipos de concretos fabricados.

Figura 43.



Nota. MR Vs Contenido de AR para los tres tipos de concretos fabricados.

Las gráficas mostradas corroboran definitivamente la poca correlación que existe entre las variables X_1 y X_2 , esto por el bajo valor que toma R^2 en ambos casos.

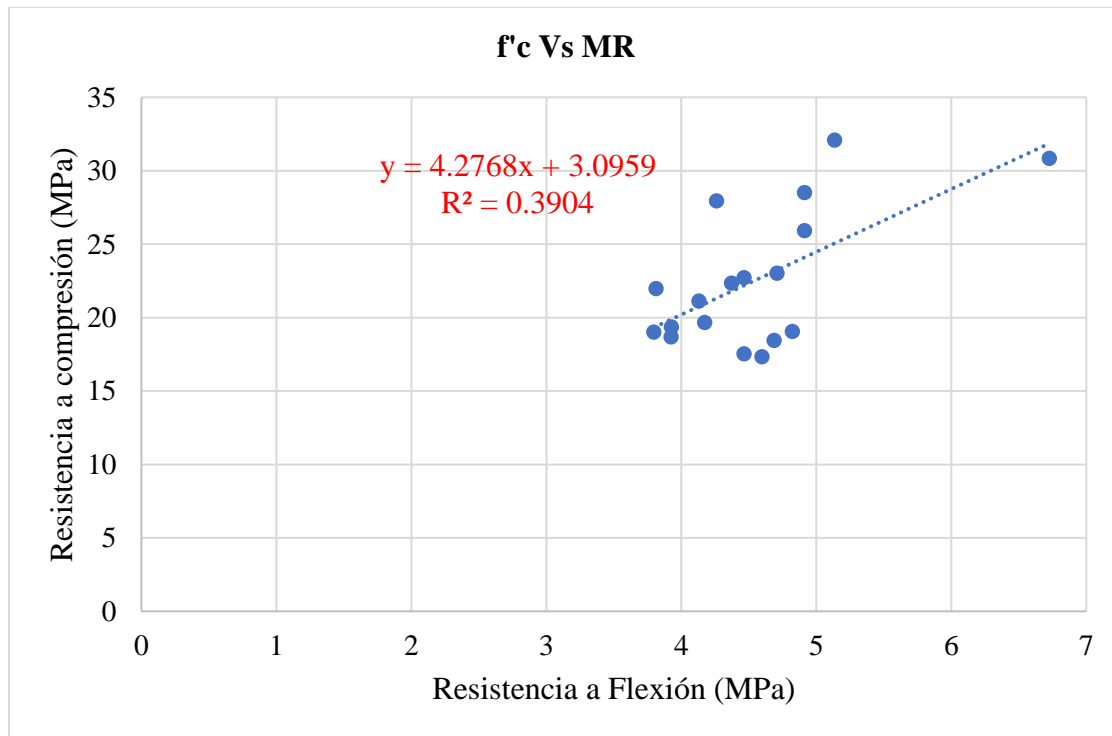
La irregularidad de los valores puede atribuirse a errores humanos, debido a que al tratarse de probetas de aproximadamente 30 Kg y de dimensiones mucho mayores a las de un cilindro, pueden atribuirse accidentes al transportarse y daños en los mismos, lo que afectaría su resistencia. A pesar de ello, los resultados siguen de cierta forma un patrón observado en las investigaciones relacionadas en la literatura, ya que al momento de compararlo con otros autores se observa que los valores también son irregulares y que no tienen siempre una tendencia definida.

7.6.3. Correlación entre f'_c y MR

El tercer y principal enfoque de discusión del presente trabajo de grado es analizar la existencia de una correlación entre la resistencia a la compresión f'_c y el módulo de rotura del

concreto. Al tratarse de dos variables se puede hacer por regresión lineal simple o un análisis gráfico sencillo de los valores obtenidos en cada variable. De la siguiente manera:

Figura 44.



Nota. Gráfica f'c Vs MR.

La anterior grafica permite resolver de manera contundente respecto a la correlación entre $f'c$ y MR, debido a que es evidente el bajo valor de R^2 , además de que visualmente los datos se encuentran demasiado dispersos. Este resultado era el esperado teniendo en cuenta la poca correlación que tuvo MR con X1 y X2; al tratarse de valores tan irregulares y sin tendencia definida es muy complicado encontrar una correlación entre este parámetro y cualquier otra variable.

7.6.4. Comparación con otros autores

Una manera de resolver discusiones e incógnitas respecto a los objetivos del trabajo de grado es comparando los resultados con los de otros autores, quienes han desarrollado investigaciones al respecto.

Se logro realizar una gráfica resumen de los principales parámetros encontrados en diversos artículos científicos.

Respecto a las propiedades de los materiales, es decir Agregado grueso reciclado, Agregado grueso natural y agregado fino, se logró resumir la siguiente información:

Tabla 55.

Recopilación de información de diversos autores. Fuente: (de Brito & Saikia, 2013).

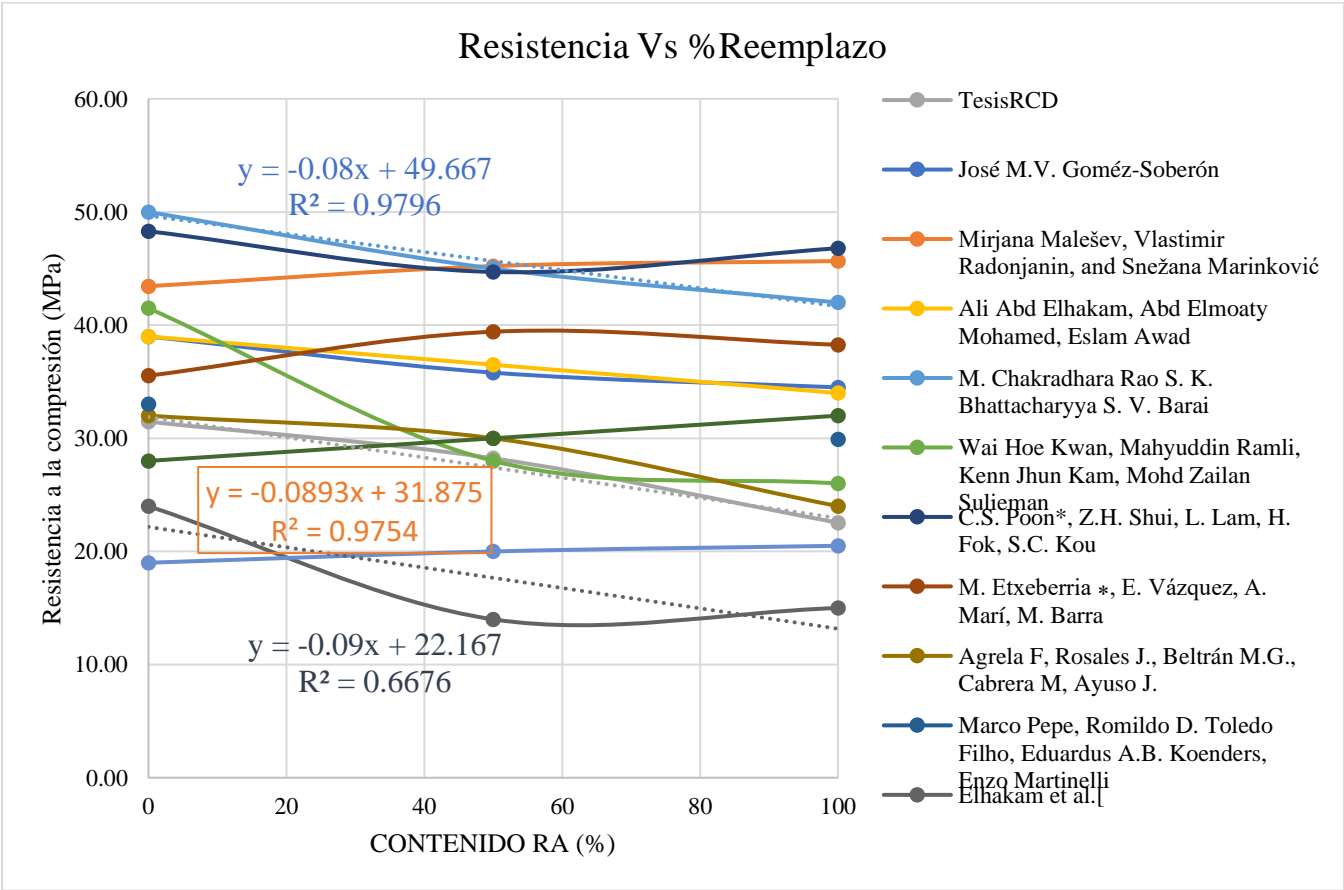
AUTOR (ES)	PROPIEDADES DE MATERIALES					
	Absorción (%)			Gravedad específica Bulk/Densidad aparente		
	AR	AN	AF	AR	AN	AF
José M.V. Gómez-Soberón	5.828	0.876	-	2.41	2.59	-
Katz, Amnon	8	-	-	2.32	-	-
Mirjana Malešev, Vlastimir Radonjanin, and Snežana Marinković	2.44	0.3	-	2.489	2.67	-
S.C. Kou, C.S. Poon	4.26	1.11		2.58	2.62	
N. Fonseca, J. de Brito, L. Evangelista	6.1	1.3	0.4	2.55	2.45	2.6

Chunheng Zhou, Zongping Chen	3.16	0.05	-	2.65	2.72
-------------------------------------	------	------	---	------	------

Nota. Adaptado de: (de Brito & Saikia, 2013).

En cuanto a la propiedad más importante estudiada, es decir, la resistencia a la compresión se logró recopilar la siguiente información de f'c a la edad de los 28 días.

Figura 45.



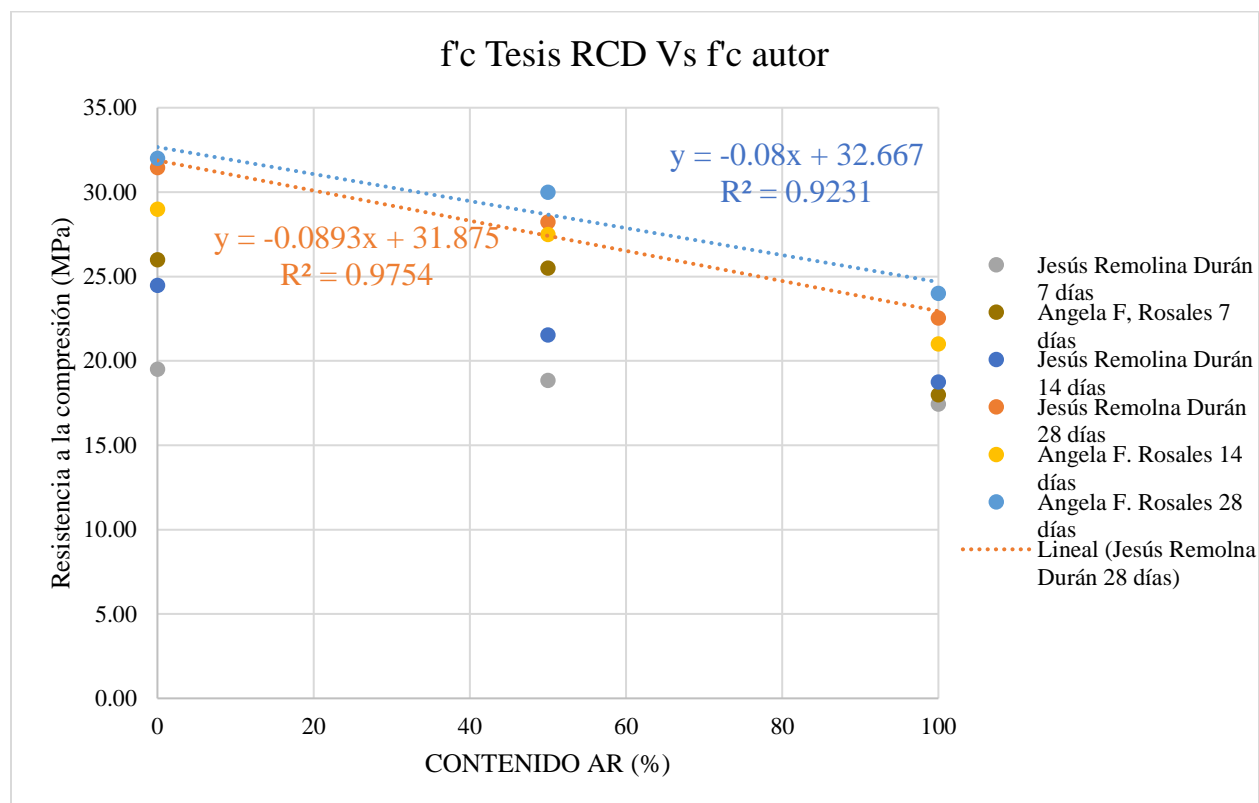
Nota. Comparación con otros autores de f'c a los 28 días.

Se logra observar que son diversas las resistencias que puede lograr alcanzar el concreto reciclado, por supuesto estos dependen en cada estudio de diversas variables como la procedencia del residuo, la relación agua cemento utilizada en la mezcla, la absorción de agua del material, su porosidad, entre muchos otros. A simple vista se observa que si es posible que el concreto reciclado alcance incluso resistencias de hasta 50MPa y que también puede ser de muy baja calidad de hasta 13MPa.

En la figura 42 se establece la línea de tendencia para los datos de dos autores que se encuentran en los extremos, es decir la máxima y la mínima resistencia alcanzada y también se hace para la del presente estudio.

Para lograr una comparación más precisa se tomará la línea que se encuentre más cerca de la presente investigación y se comparará por medio de regresión. Se obtiene inicialmente la siguiente gráfica.

Figura 46.



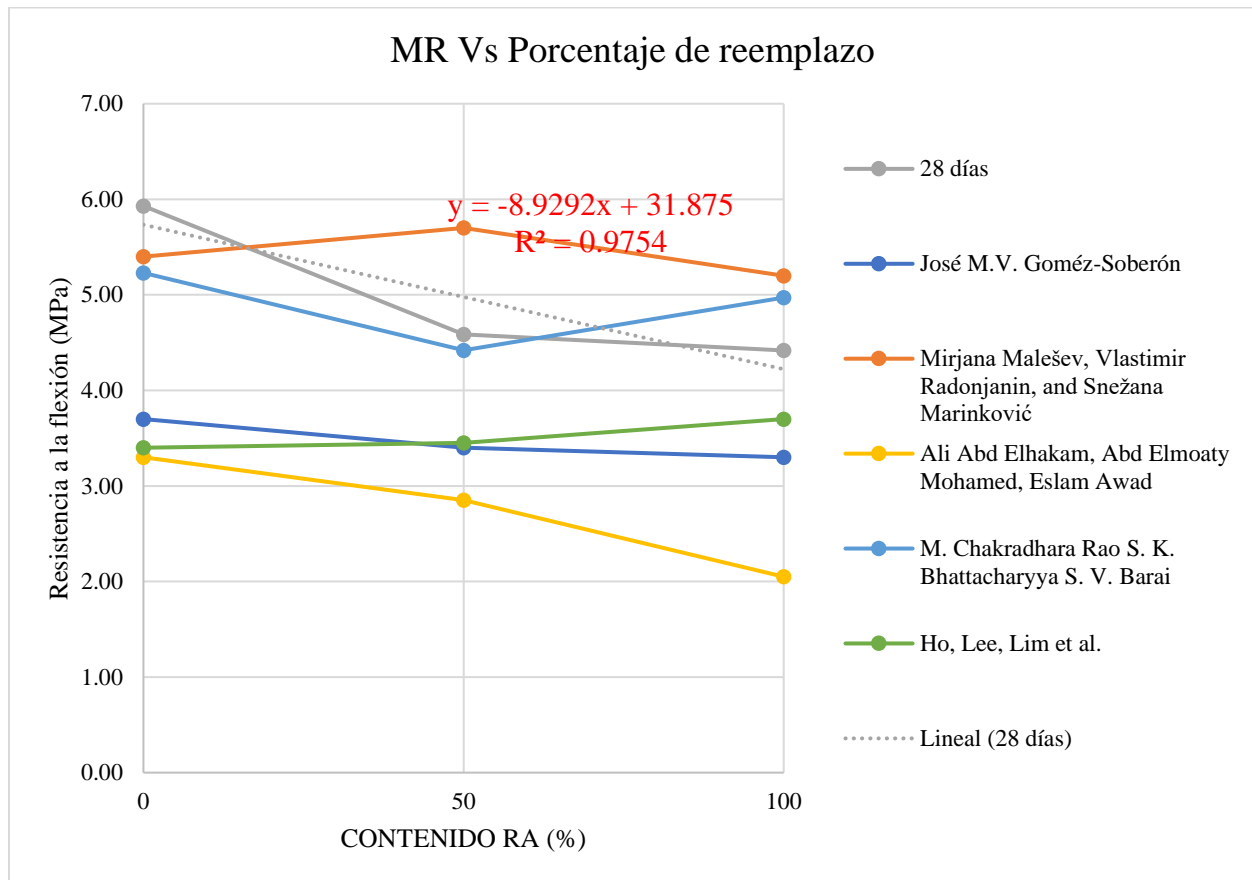
Nota. Comparación de $f'c$ con autor relacionada y concreto de características similares.

En la anterior gráfica se representaron los valores de resistencia a la compresión $f'c$ por cada una de las tres edades de curado y con base en el contenido de AR (%), trazando una línea para cada uno. La línea de tendencia se trazó en ambos casos, es decir para el presente trabajo y para la del autor relacionado, en la serie de puntos de la edad de 28 días. Encontrando así una interesante correlación y valores de R^2 aceptables en ambos casos.

La anterior gráfica también es de vital importancia debido a que es una forma directa de validar la ecuación propia de la tesis, corroborar la misma y del mismo modo nos proporciona un grado más de veracidad, debido a que es muy similar a la del autor comparado.

Para el caso del módulo de rotura MR se realizó el mismo procedimiento y se logró observar de igual forma la irregularidad de los datos y la poca tendencia definida de los mismos.

Figura 47.



Nota. Comparación de MR con otros autores.

8. Conclusiones

Gracias a la investigación desarrollada se pueden determinar conclusiones respecto a las incógnitas planteadas:

- Existe una correlación confiable entre la resistencia a la compresión del concreto reciclado (f'_c) y las dos variables independientes (Porcentaje de reemplazo y días de curado). Lo que quiere decir que si se logra estandarizar un proceso de producción/generación de agregado reciclado por medio del modelo matemático planteado se puede prever o predecir la resistencia que se obtendrá.
- No hay correlación verás de ninguna de las variables estudiadas con el módulo de rotura del concreto MR, debido a que los valores obtenidos son irregulares y no poseen tendencia definida.
- Con base en los MR obtenidos se puede afirmar que el concreto hecho con agregados de concreto reciclado de pavimento posee una alta viabilidad para utilizarse en vías urbanas de bajo tránsito y por supuesto en productos o elementos de uso no estructural como lo son los prefabricados, o productos de mobiliario urbano.
- Para el caso especial de mobiliario urbano y en especial en la ciudad de Barranquilla la problemática a abordar son aspectos de durabilidad y de estandarización de normativas entorno a este tipo de productos.
- La ciudad de Barranquilla necesita en la actualidad un estudio completo respecto a la caracterización de los RCD en la ciudad, de tal forma que esto permite a los ingenieros civiles especialmente abordar esta problemática y proponer ideas innovadoras de materiales y productos eco-sostenibles.

- Se logro un aporte al conocimiento en este tema debido a que se obtuvieron dos ecuaciones para determinar f'_c en función de dos variables y que puede sr comparada con otros estudios y permite o da apoyo a las investigaciones futuras.
- Para investigaciones futuras se recomienda complementar la evaluación mecánica con ensayos de durabilidad para complementar así la investigación.
- A nivel local y nacional el éxito de la reutilización de los RCD depende del nivel de compromiso de las investigaciones que se hagan al respecto, ya que esto llena de credibilidad a la academia y a las empresas a apostarle a la reutilización de los RCD en concreto para diversas aplicaciones.

Bibliografía

(NTC), N. T. C. INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. CEMENTO PÓRTLAND.

ESPECIFICACIONES FÍSICAS Y MECÁNICAS. Colombia.

(UAESP), U. A. E. de S. P. (2012). Foro internacional Gestión integral de los RCD.

Ajdukiewicz, A., & Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, 24(2), 269-279.

[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00012-9)

Alcaldía de Barranquilla. (2015). Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS. 2016 - 2027, 178.

Ambiente, D. D. E. (s. f.). Guía para la elaboración del Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en obra.

Angulo, S. C., Carrijo, P. M., Figueiredo, A. D., Chaves, A. P., & John, V. M. (2010). On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. *Materials and Structures*, 43(4), 519-528. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9508-9>

Angulo, S. C., John, V. M., Ulsen, C., & Kahn, H. (2014). Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos. *I Conferência Latino-Americana De Construção Sustentável X Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído*, (November 2014).

Argos. FICHA TÉCNICA CEMENTO USO ESTRUCTURAL (2017).

Arora, S., & Singh, S. P. (2017). Fatigue strength and failure probability of concrete made with RCA. *Magazine of Concrete Research*, 69(2), 55-67.

<https://doi.org/10.1680/jmacr.15.00353>

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Aridos para hormigón.

(2009). España.

Association française de Normalisation. Granulats pour béton (2017). Francia.

ASTM International. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading) (2016).

ASTM International. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (2017).

Banjad Pečur, I., Štirmer, N., & Milovanović, B. (2015). Recycled aggregate concrete for nearly zero-energy buildings. *Magazine of Concrete Research*, 67(11), 575-584.

<https://doi.org/10.1680/mac.14.00220>

Barritt, J. (2016). An overview on recycling and waste in construction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 169(2), 49-53.

<https://doi.org/10.1680/coma.15.00006>

Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S. (2014a). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, 501-516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>

Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S. (2014b). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, 501-516.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>

Bell, N. (2003). WASTE MINIMISATION AND RESOURCE RECOVERY. *Environment Design Guide*, 1-7. Recuperado a partir de <http://www.jstor.org/stable/26148421>

Bobadilla, R. (2012). ESTADO DEL ARTE DEL APROVECHAMIENTO DEL CONCRETO RECICLADO, 237.

Bran, A. (2016). Propuesta para el manejo integral de los residuos de la construcción y la demolición.

Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015). Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of Cleaner Production*, 99, 59-74. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.012>

Camacol Bogotá y Cundinamarca - Construcción Sostenible. (s. f.).

Cembureau. (2012). *Activity report 2012*. Recuperado a partir de <http://www.cembureau.be/%0Aactivityreports>

Cembureau. (2013). *Activity report 2013*. Recuperado a partir de <http://www.cembureau.be/%0Aactivityreports>

Cembureau. (2014). *Activity report 2014*. Recuperado a partir de <http://www.cembureau.be/%0Aactivityreports>

Cembureau. (2016). *Activity Report 2016*. Recuperado a partir de <http://www.cembureau.be/%0Aactivityreports>

Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2011a). Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. *Construction and Building Materials*, 25(1), 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.055>

Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2011b). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures*, 44(1), 205-220. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9620-x>

Chau, C. K., Leung, T. M., & Ng, W. Y. (2015). A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle

- Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *Applied Energy*, 143, 395-413. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>
- Comisión asesora permanente para el regimen de construcciones sismo resistentes. (2010). El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), 530-827.
- Committee ACI 211. (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal , Heavyweight , and Mass Concrete (ACI 211 . 1-91)*.
- Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2009). Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(1), 289-294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.006>
- Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2010). Recycling of rubble from building demolition for low-shrinkage concretes. *Waste Management*, 30(4), 655-659. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.026>
- Costa, U., & Ursella, P. (2003). *Construction and demolition waste recycling in Italy, WASCON 2003—Progress on the road to sustainability*. San sebastian, España.
- Courard, L., Michel, F., & Delhez, P. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete. *Construction and Building Materials*, 24(3), 390-395. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.040>
- de Brito, J., & Alves, F. (2010). Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research. *Materials and Structures*, 43(S1), 35-51. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9595-7>
- de Brito, J., & Saikia, N. (2013). *Recycled Aggregate in Concrete*. London: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4540-0>
- DE GUZMAN SANCHEZ, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Cali.

- de Santos, D., Monercillo, B., & García, A. (2011). Gestión de residuos en las obras de construcción y demolición (2.^a ed., p. 26).
- del Río Merino, M., Izquierdo Gracia, P., & Weis Azevedo, I. S. (2010). Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered. *Waste Management & Research*, 28(2), 118-129. <https://doi.org/10.1177/0734242X09103841>
- Dias, N., & Carvalho, M. T. (s. f.). Recovery of Packaging Glass Refuse By Mechanical Biological Treatment Plant- Case Study, 2-12.
- Dimoudi, A., & Tompa, C. (2008). Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1-2), 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.09.008>
- Dr.S.R.Choudhari, A. N. D., & Dr.A.R.Gajbhiye. (2012). Performance Evaluation Of Recycled Aggregate Used In Concrete, 5.
- EC Commision of the European communities. (2000). 532/200/CE *Construction and demolition waste*.
- Eguchi, K., Teranishi, K., Nakagome, A., Kishimoto, H., Shinozaki, K., & Narikawa, M. (2007). Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1542-1551. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.023>
- EPD. (2015). Monitoring of Solid Waste in Hong Kong 2014.
- Escombros, M. D. E., La, E. N., Bogotá, C. D. E., La, E. N., & Bogotá, C. D. E. (2013). Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75029150005>.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete.

Cement and Concrete Research, 37(5), 735-742.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>

European Commission Environment. (2011). Construction and Demolition Waste management.

Recuperado a partir de http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/mixed_waste.htm

European Parliament and Council. (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and

of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives. *Official*

Journal of the European Union, 3-30. [https://doi.org/2008/98/EC.; 32008L0098](https://doi.org/2008/98/EC.;32008L0098)

Eurostat (2011). (2011). Waste statistics, European commission. Recuperado 8 de diciembre de

2017, a partir de <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>

statistics_%0Aexplained/index.php/Waste_statistics

Evangelista, L., & de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled

concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 397-401.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>

FIGUEREDO, J. V., & PADILLA, E. P. (2017). OBTENCIÓN DE UNA MEZCLA DE

CONCRETO CON RESIDUOS PLÁSTICOS DE EQUIPOS ELECTRÓNICOS PARA LA

FABRICACIÓN DE ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES, 0-171.

Fischer, C., Werge, M. (2009). *EU as a recycling society: Present recycling levels of municipal*

waste and construction demolition waste in the EU. ETC. SCP. Copenhagen.

Franklin Associates, & Prairie Village, K. (1998). *Characterization of building-related*

construction and demolition debris in the United States Report No. EPA530-R-98-010

prepared for The U.S. Environmental Protection Agency.

Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to «low-CO₂» cements. *Cement and*

Concrete Research, 34(9), 1489-1498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>

Gómez-Soberón, J. M. . (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1301-1311.

[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00795-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00795-0)

González-Fonteboa, B., & Martínez-Abella, F. (2008). Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. *Building and Environment*, 43(4), 429-437. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.008>

González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., Eiras-López, J., & Seara-Paz, S. (2011). Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. *Materials and Structures*, 44(10), 1759-1771. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9736-7>

Gutierrez, A. (2013). Hormigon Reciclado.

H.Kosmatka, S., & L.wilson, M. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures*.

Construction. Recuperado a partir de

<http://www.cement.org/bookstore/supporting/cd100/EB001Frt.pdf>

Halmeman, M. C. R., Souza, P. C. de, & Casarin, A. N. (2009). Caracterização dos resíduos de construção e demolição na unidade de recebimento de resíduos sólidos no município de Campo Mourão – PR. *Revista Tecnológica*, 203-209.

Ho, N. Y., Lee, Y. P. K., Lim, W. F., Chew, K. C., Low, G. L., & Ting, S. K. (2015). Evaluation of RCA concrete for the construction of Samwoh Eco-Green Building. *Magazine of Concrete Research*, 67(12), 633-644. <https://doi.org/10.1680/mac.14.00212>

Hook, W. R., Cole, L. W., Cost, V. T., Diulus, D. H., & Mullarky, J. I. (2001). Guide for Design and Construction of Concrete Parking Lots Reported by ACI Committee 330. *Concrete*, 92(Reapproved), 1-32.

Hooton, R., & Gómez-Soberón, J. (2003). Relationship Between Gas Adsorption and the

- Shrinkage and Creep of Recycled Aggregate Concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, 25(2), 11386. <https://doi.org/10.1520/CCA10442J>
- HUANG, S., & ZHAO, X. (2009). *Recycled aggregate. Sichuan Building Science* (Vol. 1). IMCYC. (s. f.).
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. CEMENTO PORTLAND. CLASIFICACIÓN Y NOMENCLATURA (2014).
- Intergovernmental Panel on Climate change. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report*. Recuperado a partir de <http://www.cambridge.org/co/academic/subjects/earth-and-environmental-science/climatology-and-climate-change/climate-change-2007-physical-science-basis-working-group-i-contribution-fourth-assessment-report-ipcc?format=PB&isbn=9780521705967#ZLO59QBvldKCbkO>
- Jo, B.-W., Park, S.-K., & Park, J.-C. (2008). Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 22(12), 2281-2291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.009>
- Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 703-711. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01033-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01033-5)
- KAWANO, H. (2000). Outline of JIS/TR on recycled concrete using recycled aggregate. International Workshop on Recycled Aggregate (p. 43.48). Nigata, Japan.
- Kia, A., Wong, H. S., & Cheeseman, C. R. (2017). Clogging in permeable concrete: A review. *Journal of Environmental Management*, 193, 221-233. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>

KIER. (2008). Sustainable construction: simple ways to make it happen. *IHS BRE Press*.

Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S., & Dutta, S. C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material.

Construction and Building Materials, 131, 721-740.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>

Letelier, V., Tarela, E., Osses, R., Cárdenas, J. P., & Moriconi, G. (2016). Mechanical Properties of Concrete With Recycled Aggregates and Waste Glass. *Structural Concrete*, (1), 4-10.

<https://doi.org/10.1002/suco.201500143>

Levy, S. M., & Helene, P. (2004). Durability of recycled aggregates concrete: A safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 1975-1980.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.009>

Li, J., Xiao, H., & Zhou, Y. (2009). Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1287-1291.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.019>

LIMA, A. S., & CABRAL, A. E. B. (2013). Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 18(2),

169-176. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200009>

Limbachiya, M. C. (2010). Recycled aggregates: Production, properties and value-added sustainable applications. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25(6),

1011-1016. <https://doi.org/10.1007/s11595-010-0140-x>

Limbachiya, M. C., Marrocchino, E., & Koulouris, A. (2007). Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. *Waste Management*.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.01.005>

- Limbachiya, M., Koulouris, A., Roberts, J., & Fried, A. (2004). Properties of recycled aggregate concrete. En *RILEM international symposium on environment-conscious materials and systems for sustainable development* (p. 136).
- Lovato, P. S., Possan, E., Molin, D. C. C. D., Masuero, Â. B., & Ribeiro, J. L. D. (2012). Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 26(1), 437-447.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.043>
- Lye, C.-Q., Dhir, R. K., & Ghataora, G. S. (2016). Shrinkage of recycled aggregate concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 169(12), 867-891. <https://doi.org/10.1680/jstbu.15.00138>
- Marie, I., & Quiasrawi, H. (2012). Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 37, 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.020>
- Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., & Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*, 30(11), 2255-2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>
- McGinnis, M. J., Davis, M., de la Rosa, A., Weldon, B. D., & Kurama, Y. C. (2017). Quantified sustainability of recycled concrete aggregates. *Magazine of Concrete Research*, 69(23), 1203-1211. <https://doi.org/10.1680/jmacr.16.00338>
- McNeil, K., & Kang, T. H.-K. (2013). Recycled Concrete Aggregates: A Review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1), 61-69. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>
- Mena, C., & Valdés, Y. (2014). *Dosificación óptima de una mezcla de concreto con materiales reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) de la ciudad de*

Cali para uso en obras viales de bajo tránsito.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución No 0472 del 28 de Febrero del 2017 (2017). Colombia.

Nixon, P. J. (1978). Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review. *Matériaux et Constructions*, 11(5), 371-378. <https://doi.org/10.1007/BF02473878>

O. Rageh, M., Hosny, H., & Abdel-Rehem, A. (2017). Sustainability Requirements of Concrete Structures. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5(5), 174-186. <https://doi.org/10.12691/ajcea-5-5-1>

Oikonomou, N. D. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 315-318. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020>

Pacheco Bustos, C. A., Fuentes Pumarejo, L. G., Sánchez Cotte, É. H., & Rondón Quintana, H. A. (2017). Construction demolition waste (CDW), a perspective of achievement for the city of Barranquilla since its management model. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 533-555. <https://doi.org/10.14482/inde.35.2.10174>

Pataki, D. E., Emmi, P. C., Forster, C. B., Mills, J. I., Pardyjak, E. R., Peterson, T. R., ... Dudley-Murphy, E. (2009). An integrated approach to improving fossil fuel emissions scenarios with urban ecosystem studies. *Ecological Complexity*, 6(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2008.09.003>

Pavón, E., Etxeberria, M., & Díaz, N. E. (2012). Estudio de la aplicabilidad del hormigón con árido grueso reciclado en La Habana, Cuba. *Materiales de Construcción*, 62(307), 431-441. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.63210>

Peng, C. (2016). Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. *Journal of Cleaner Production*, 112, 453-465.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.078>

Pereira, L. (2002). *Construction and demolition waste recycling: the case of the Portuguese northern region (in Portuguese)*. Minho University.

Poon, C. ., Shui, Z. ., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18(6), 461-468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>

Poon, C. S. (2007). Reducing construction waste. *Waste Management*, 27(12), 1715-1716. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.013>

Poon, C. S., Kou, S. C., & Lam, L. (2007). Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Materials and Structures*, 40(9), 981-988. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9192-y>

Porrero, J., Ramos, C., Grases, J., & Velazco, G. J. (2014). *MANUAL DEL CONCRETO ESTRUCTURAL*. Venezuela.

Quiroz, M., & Salamanca, L. (2006). *APOYO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE EN LA ASIGNATURA DE «TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN»*. UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN.

Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, 42(1), 407-415. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.033>

Rakshvir, M., & Barai, S. V. (2006). Studies on recycled aggregates-based concrete. *Waste Management & Research*, 24(3), 225-233. <https://doi.org/10.1177/0734242X06064820>

Reixach, F., Cuscó, A., & Barroso, J. (2000). *Situación actual y perspectivas de futuro de los residuos de la construcción*. Cataluña, España.

Romero, E. (2006). Residuos de Construcción y Demolición. España. Recuperado a partir de

http://www.uhu.es/emilio.romero/docencia/Residuos_Construccion.pdf

Rosas Chaves, J. A. (2014). Mobiliario urbano prefabricado en concreto con agregado grueso reciclado. Recuperado a partir de

<http://www.bdigital.unal.edu.co/47108/1/396288.2014COMPLETA.pdf>

Sabău, M., Pop, I., & Oneț, T. (2016). Experimental study on local bond stress-slip relationship in self-compacting concrete. *Materials and Structures*, 49(9), 3693-3711.

<https://doi.org/10.1617/s11527-015-0749-5>

Sadrmomtazi, A., Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O., & Sadeghi-Nik, A. (2016). The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2363-2373. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.107>

Sanchez de guzman, D. (1996). *TECNOLOGÍA DEL COONCRETO Y DEL MORTERO* (3.^a ed.). Bogotá.

Sandler, K., & Swingle, P. (2006). *OSWER Innovations Pilot: Building Deconstruction and Reuse*. Recuperado a partir de <http://www.epa.gov/oswer/>

Secretaría Distrital de Ambiente. (2012). Resolución 01115 de 2012: “Por medio de la cual se adoptan los lineamientos Técnico - Ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital.” *Registro Distrital 4977 de octubre 1 de 2012.*, 1-19.

Senthil Kumar, K., & Baskar, K. (2014). Response Surfaces for Fresh and Hardened Properties of Concrete with E-Waste (HIPS). *Journal of Waste Management*, 2014, 1-14.

<https://doi.org/10.1155/2014/517219>

Shen, L. Y., Tam, V. W. Y., Tam, C. M., & Drew, D. (2004). Mapping Approach for Examining

Waste Management on Construction Sites, *130*(August), 472-481.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:4\(472\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:4(472))

Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., & Xie, Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 466-472.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>

Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production.

Construction and Building Materials, *65*, 201-217.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>

Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2015). The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review. *European Journal of Environmental and*

Civil Engineering, *19*(7), 825-849. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.974831>

Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2017). Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. *Journal of*

Cleaner Production, *143*, 598-614. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.070>

Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production.

Construction and Building Materials, *65*, 201-217.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>

Specifications for concrete with recycled aggregates. (1994). *Materials and Structures*, *27*(9), 557-559. <https://doi.org/10.1007/BF02473217>

Suocheng, D., Tong, K. W., & Yuping, W. (2001). Municipal solid waste management in China: using commercial management to solve a growing problem. *Utilities Policy*, *10*(1), 7-11.

[https://doi.org/10.1016/S0957-1787\(02\)00011-5](https://doi.org/10.1016/S0957-1787(02)00011-5)

Surya, M., VVL, K. R., & Lakshmy, P. (2013). Recycled Aggregate Concrete for Transportation Infrastructure. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 1158-1167.

<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.212>

Susunaga Monroy, J. M. (2013). Construcción Sostenible, Una Alternativa Para La Edificación De Viviendas De Interes Social Y Prioritario. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689-1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

The Netherlands Standardization Institute (NEN). Aggegates for concrete (2005). Holanda.

Topçu, İ. B., & Şengel, S. (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1307-1312.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.019>

Tu, T.-Y., Chen, Y.-Y., & Hwang, C.-L. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 943-950.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.022>

United Nations Conference on Environment and Development (UNCED). (1992). Agenda 21, the Rio Declaration on Environment and Development, the Statement of Forest Principles, the United Nations Framework Convention on Climate Change and the United Nations Convention on Biological Diversity. Rio de Janeiro.

United Nations Environment Programme. (2009). *Common carbon metric for measuring energy use and reporting greenhouse gas emissions from building operations*.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2009). *Building and Climate Change: Summary for Decision-Makers, Sustainable Buildings & Climate Initiative*.

Universidad de san simon. (2006). *Libro básico sobre tecnología del concreto*.

- Ürge-Vorsatz, D., & Novikova, A. (2008). Potentials and costs of carbon dioxide mitigation in the world's buildings. *Energy Policy*, 36(2), 642-661.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.10.009>
- US Department of Transportation. (2004). *Transportation Applications Of Recycled Concrete Aggregate - State of the Practice National Review September 2004*. Recuperado a partir de <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/applications.pdf>
- Vadera, S., Woolas, P., Flint, C., Pearson, I., Hodge, M., Jordan, W., & Davies, M. (2008). Strategy for sustainable construction. *Materials Science*, (June), 64.
<https://doi.org/8731/2k/6/08/NP URN 08/973>
- Wang, J., Kang, X., & Tam, V. W. (2008). An investigation of construction wastes: an empirical study in Shenzhen. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 6(3), 227-236.
<https://doi.org/10.1108/17260530810918252>
- Waste, S., & Response, E. (2000). OSWER Innovation Project Success Story:, 1-4.
- World Construction Aggregates - Industry Market Research, Market Share, Market Size, Sales, Demand Forecast, Market Leaders, Company Profiles, Industry Tre. (s. f.).
- Xiao, J., Li, J., & Zhang, C. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1187-1194.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.020>
- Xiao, J., & Zhang, G. (s. f.). Research and Modification on Recycled Aggregates, (1), 2-9.
- Yanik, K. (s. f.). Report: Global demand for aggregates to rise. Recuperado 6 de diciembre de 2017, a partir de <http://www.pitandquarry.com/report-global-demand-for-aggregates-to-rise/>
- Youcai, Z., & Sheng, H. (2017). General Introduction of Construction and Demolition Waste. En *Pollution Control and Resource Recovery* (pp. 1-14). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811754-5.00001-4>

Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Skoczylas, F., & Wirquin, E. (2003). Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 223-232. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00010-0)

Anexos

ANEXO 1: Pruebas mecánicas a compresión y flexión.



ANEXO 2: Probetas cilíndricas y viguetas al primer día de curado.



ANEXO 3: Registro de probetas falladas

